



Universidad  
Nacional  
de Loja

# Universidad Nacional de Loja

## Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables

### Carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente

#### “Influencia del tráfico vehicular en la calidad del aire de la ciudad de Loja a través del biomonitoreo de *Tillandsia usneoides*”

Trabajo de Titulación previo a la  
obtención del título de Ingeniero en  
Manejo y Conservación del Medio  
Ambiente

**Autor:**

María Belén Cango González

**Director:**

Ing. Erasmo Vinicio Alvarado Jaramillo, Mg. Sc.

Loja – Ecuador

2023

## Certificación

Loja, 8 de agosto de 2022

Ing. Erasmo Vinicio Alvarado Jaramillo, Mg. Sc.

**DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

### **CERTIFICO:**

Que he revisado y orientado todo el proceso de elaboración del Trabajo de Titulación denominado: “**Influencia del tráfico vehicular en la calidad del aire de la ciudad de Loja a través del biomonitoreo de *Tillandsia usneoides***”, previo a la obtención del título de **Ingeniera en Manejo y Conservación del Medio Ambiente**, de la autoría de la estudiante **María Belén Cango González**, con cédula de identidad **Nro.1105060295**, una vez que el trabajo cumple con todos los requisitos exigidos por la Universidad Nacional de Loja, para el efecto, autorizo la presentación del mismo para su respectiva sustentación y defensa.



Firmado electrónicamente por:

**ERASMO VINICIO  
ALVARADO  
JARAMILLO**

Ing. Erasmo Vinicio Alvarado Jaramillo. Mg. Sc.

**DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

## Autoría

Yo, **María Belén Cango González**, declaro ser autor del presente Trabajo de Titulación: **“Influencia del tráfico vehicular en la calidad del aire de la ciudad de Loja a través del biomonitoreo de *Tillandsia usneoides*”** y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos y acciones legales, por el contenido del mismo. Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja la publicación de mi Trabajo de Integración Curricular o de Titulación, en el Repositorio Digital Institucional – Biblioteca Virtual.

### Firma:



**Cédula de identidad:** 1105060295

**Fecha:** 22 de febrero de 2023

**E-mail:** maria.b.cango@unl.edu.ec

**Teléfono:** 0988420218

**Carta de autorización por parte del autor, para consulta, reproducción parcial o total y/o publicación electrónica del texto completo, del Trabajo de Titulación.**

Yo, **María Belén Cango González**, declaro ser autora del Trabajo de Titulación denominado: **“Influencia del tráfico vehicular en la calidad del aire de la ciudad de Loja a través del biomonitoreo de *Tillandsia usneoides*”**, como requisito para optar por el título de **Ingeniera en Manejo y Conservación del Medio Ambiente**, autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que, con fines académicos, muestre la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja no se responsabiliza por el plagio o copia del Trabajo de Titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los veintidós días del mes de febrero del dos mil veintitrés.

**Firma:**

**Cédula de identidad:** 1105060295



**Dirección:** Barrio Los Molinos, Loja.

**Correo electrónico:** maria.b.cango@unl.edu.ec

**Teléfono:** 0988420218

**DATOS COMPLEMENTARIOS**

**Director del Trabajo de Titulación:** Ing. Erasmo Vinicio Alvarado Jaramillo, Mg. Sc.

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo, fruto de todo el esfuerzo, la perseverancia y la disciplina a mi padre Tomas Hernán, quien desde el cielo me cuida, me protege y me guía, dándome las fuerzas necesarias para seguir adelante sin desmayar.

**María Belén Cango González**

## **Agradecimiento**

Agradezco a Dios por darme la vida para poder llegar a cumplir uno de mis más grandes sueños, el ser Ingeniera.

A mi familia, especialmente a mi madre Judith González, quien ha sido el pilar fundamental para mi desarrollo personal y profesional.

A mis hermanos Bruno y Azucena, que me han apoyado en todo el transcurso de mi formación académica de manera incondicional con sus consejos y sus regaños, los que hoy en día, los llevo plasmados en lo más profundo de mi memoria.

A mis docentes, por sembrar valores, sabiduría, ciencia y amor, para tener éxito en todo mi proceso de aprendizaje y para el futuro.

A mis colegas por compartir conmigo en los buenos y malos momentos, sin duda alguna, los llevo en mi corazón.

Finalmente, me agradezco a mí, por creer en mí, ha sido un camino arduo el cual hoy culmina y empiezan nuevos retos, los cuales afrontaré con la misma firmeza que me cataloga.

**María Belén Cango González**

## Índice de Contenidos

<b>Portada</b> .....	<b>i</b>
<b>Certificación</b> .....	<b>ii</b>
<b>Autoría</b> .....	<b>iii</b>
<b>Carta de autorización</b> .....	<b>iv</b>
<b>Dedicatoria</b> .....	<b>v</b>
<b>Agradecimiento</b> .....	<b>vi</b>
<b>Índice de Contenidos</b> .....	<b>vii</b>
Índice de Tablas .....	x
Índice de Figuras.....	x
Índice de Anexos .....	xi
<b>1.    Titulo</b> .....	<b>1</b>
<b>2.    Resumen</b> .....	<b>2</b>
2.1. Abstract .....	3
<b>3.    Introducción</b> .....	<b>4</b>
<b>4.    Marco teórico</b> .....	<b>7</b>
4.1. Calidad del aire.....	7
4.1.1. <i>Factores que controlan la distribución de temperatura del aire</i> .....	7
4.1.2. <i>Contaminación atmosférica</i> .....	11
4.1.3. <i>Fuentes de contaminación</i> .....	11
4.1.4. <i>Límites máximos permisibles y Normativa ambiental</i> .....	12
4.2. Biomonitorio.....	15
4.2.1. <i>Métodos de biomonitorio</i> .....	15
4.2.2. <i>Tillandsia usneoides como bioindicador de la calidad del aire</i> .....	16
4.2.3. <i>Características biológicas de Tillandsia usneoides</i> .....	17
4.3. Material Particulado .....	18

4.3.1.	<i>Definición</i> .....	18
4.3.2.	<i>Límites máximos permisibles y Normativa ambiental</i> .....	19
4.3.3.	<i>Tipos de muestreo</i> .....	19
4.3.4.	<i>Sensores en Arduino UNO</i> .....	21
4.4.	Polvo Sedimentable.....	22
4.4.1.	<i>Definición</i> .....	22
4.4.2.	<i>Límite máximo permisible y Normativa ambiental</i> .....	22
4.4.3.	<i>Técnicas de muestreo</i> .....	23
4.4.4.	<i>Colectores pasivos</i> .....	23
4.4.5.	<i>Método gravimétrico</i> .....	24
4.4.6.	<i>Desventajas de los colectores pasivos</i> .....	24
<b>5.</b>	<b>Metodología</b> .....	<b>26</b>
5.1.	Área de estudio.....	26
5.2.	Establecimiento de la línea base para el tráfico vehicular y para biomonitorio con <i>Tillandsia usneoides</i> en la ciudad de Loja .....	28
5.3.	Determinación de la concentración de Pb, Cd y Cu a través de biomonitorio con <i>Tillandsia usneoides</i> .....	32
5.4.	Determinación de la concentración de material particulado 2,5 en los diferentes puntos de biomonitorio.....	33
5.4.1.	<i>Muestreo de polvo sedimentable</i> .....	33
5.5.	Análisis la incidencia del tráfico vehicular en la calidad del aire de la ciudad de Loja. ....	34
5.6.	Análisis estadístico.....	34
5.6.1.	<i>Análisis de los datos correspondiente al biomonitorio</i> .....	34
5.6.2.	<i>Análisis de los datos correspondiente al monitoreo de Material Particulado 2,5.</i>	

5.6.3.	<i>Análisis de datos correspondientes a polvo sedimentable</i> .....	35
<b>6.</b>	<b>Resultados</b> .....	<b>36</b>
6.1.	Cuantificación de la carga vehicular y biomonitoreo de <i>T. usneoides</i> .....	36
6.2.	Determinación de la concentración de Pb, Cd y Cu a través de biomonitoreo con <i>Tillandsia usneoides</i> .....	40
6.3.	Determinación de la concentración de material particulado 2,5 en los diferentes puntos de biomonitoreo.....	41
6.4.	Análisis de la incidencia del tráfico vehicular en la calidad del aire de la ciudad de Loja .....	47
<b>7.</b>	<b>Discusión</b> .....	<b>49</b>
<b>8.</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>53</b>
<b>9.</b>	<b>Recomendaciones</b> .....	<b>54</b>
<b>10.</b>	<b>Bibliografía</b> .....	<b>55</b>
<b>11.</b>	<b>Anexos</b> .....	<b>64</b>

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Principales medios de movilización en Loja.....	29
<b>Tabla 2.</b> Clasificación de los tipos de vehículos .....	30
<b>Tabla 3.</b> Estratos de estudio para el biomonitoreo .....	36

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Jarra de muestreo de partículas sedimentables .....	25
<b>Figura 2.</b> Mapa del área de estudio .....	26
<b>Figura 3.</b> Especies de árboles que se encontraban en la zona de estudio.....	31
<b>Figura 4.</b> Mapa de puntos correspondiente al biomonitoreo.....	32
<b>Figura 5.</b> Cantidad de vehículos por tipo de combustible .....	37
<b>Figura 6.</b> Cantidad de vehículos por tipo .....	39
<b>Figura 7.</b> Rosa de los vientos .....	40
<b>Figura 8.</b> Registro de las concentraciones de metales en $\mu\text{g/g}$ , obtenidos del análisis químico .....	41
<b>Figura 9.</b> Concentraciones de PM 2,5 para el 26 y 27 de enero 2022 cada 30 minutos .....	42
<b>Figura 10.</b> Concentraciones de PM 2,5 para el 29 y 30 de enero del 2022 cada 30 minutos..	42
<b>Figura 11.</b> Concentraciones de PM 2,5 para el 31 de enero y 01 de febrero del 2022 cada 30 minutos.....	43
<b>Figura 12.</b> Concentraciones de PM 2,5 para el 02 y 03 de febrero 2022 cada 30 minutos.....	43
<b>Figura 13.</b> Concentraciones de PM 2,5 para el 04 y 05 de febrero 2022 cada 30 minutos.....	44
<b>Figura 14.</b> Concentraciones de PM 2,5 para el 07 y 08 de febrero 2022 cada 30 minutos.....	44
<b>Figura 15.</b> Concentraciones de polvo sedimentable durante dos meses y medio de muestreo.....	45
<b>Figura 16.</b> Correlación de Spearman. Tráfico vehicular vs metales traza presentes en el polvo sedimentable .....	46
<b>Figura 17.</b> Concentración de metales traza presentes en el polvo sedimentable, detallado a cada zona de estudio.....	47
<b>Figura 18.</b> Correlación de Spearman entre los metales encontrados en <i>T. usneoides</i> vs tráfico vehicular .....	48

## Índice de Anexos

<b>Anexo 1.</b> Registro de carga vehicular tabulado en Excel .....	64
<b>Anexo 2.</b> Recolección de las muestras de Tillandsia usneoides .....	65
<b>Anexo 3.</b> Análisis de metales pesados obtenidos de Tillandsia usneoides. ....	66
<b>Anexo 4.</b> Procesamiento de la especie en el laboratorio.....	66
<b>Anexo 5.</b> Colocación del Sensor Arduino Uno en los diferentes sitios de muestreo.....	67
<b>Anexo 6.</b> Colocación de colectores pasivos y cambios de filtros. ....	68
<b>Anexo 7.</b> Pesos obtenidos del Análisis Gravimétrico en el segundo cambio de filtros.....	69
<b>Anexo 8.</b> Clasificación de los vehículos por tipo y por combustible.....	70
<b>Anexo 9.</b> Análisis químico del polvo sedimentable para la obtención de metales traza .....	70
<b>Anexo 10.</b> Concentraciones de Plomo y Cadmio .....	71
<b>Anexo 11.</b> Concentraciones de PM 2,5 cada 30 minutos.....	73
<b>Anexo 12.</b> Certificación de traducción del Resumen (Abstract) .....	74

## **1. Título**

“Influencia del tráfico vehicular en la calidad del aire de la ciudad de Loja a través del biomonitoreo de *Tillandsia usneoides*”

## 2. Resumen

Las emisiones provenientes del tráfico vehicular tienen una relación directa con el incremento del parque automotor, no obstante, existen algunas consideraciones, para poder determinar el impacto que están produciendo estas. Entre los principales compuestos emitidos por el tráfico vehicular se encuentran los metales pesados, el material particulado 2,5; Sox; NOx; O<sub>3</sub>, entre otros. Es por ello que, existió la necesidad de estudiar la inferencia que tiene el tráfico vehicular en la calidad del aire de la ciudad de Loja, esto mediante el uso de *Tillandsia usneoides* (L), el cual es un organismo bioacumulador. Conjuntamente con, un estudio de polvo sedimentable a través de colectores pasivos, y un sensor en Arduino para registrar el comportamiento de material particulado 2.5 (PM) en la zona urbana de la ciudad. Para este estudio se seleccionaron 12 puntos de muestreo, subdividiéndose de la siguiente manera: norte (3), centro (3), sur (3) y punto de control (3). El tiempo de muestreo para PM y para polvo sedimentable se estimó para dos meses y medio, mientras que, el biomonitoreo consistió en la toma de 60 muestras, cinco muestras por los 12 puntos de muestreo. Los resultados obtenidos demostraron que, la calidad del aire en la ciudad de Loja se encuentra dentro del rango bueno que va de 0 a 50, no obstante, al realizar el análisis en laboratorio para polvo sedimentable, en la zona norte, específicamente en el punto 11 correspondiente a “Las Pitas” las concentraciones exceden el límite máximo permitido por la normativa nacional, esto puede deberse a que, es un paso de transporte pesado y existe gran afluencia de vehículos por ser una zona comercial. De la misma manera, al realizar el análisis de plomo, cobre y cadmio en *Tillandsia*, se pudo observar que las concentraciones absorbidas son muy bajas, por lo que, se puede inferir que, en los puntos de muestreo no se generan altas concentraciones de estos metales que son provenientes principalmente del tráfico vehicular.

**Palabras clave:** biomonitoreo, tráfico vehicular, material particulado, metales pesados, contaminación atmosférica.

## 2.1. Abstract

Emissions from vehicular traffic are directly related to the vehicle fleet, however, there are some considerations to be able to determine the impact that these are producing. Among the main compounds emitted by vehicular traffic are heavy metals, particulate matter 2,5; Sox; NOx; O<sub>3</sub>, among others. That is why there was a need to study the inference that vehicular traffic has on the air quality of Loja city, this through the use of *Tillandsia usneoides*, which is a bioaccumulator organism. Together with a study of sedimentable dust through passive collectors, and an Arduino sensor to record the behavior of particulate matter 2.5 (PM) in the urban area of the city. For this study, 12 sample points were selected, subdivided as follows: north (3), center (3), south (3) and control point (3). The sampling time for PM and settleable dust was estimated for two and a half months, while the biomonitoring consisted of taking 60 samples, five samples for the 12 sampling points. The results obtained showed that the air quality in Loja city is within the good range that goes from 0 to 50, nevertheless, when carrying out the laboratory analysis for sedimentable dust, in the northern zone, specifically in the point 11 corresponding to "Las Pitas" the concentrations exceed the maximum limit allowed by national regulations, this may be due to the fact that it is a heavy transport step and there is a large influx of vehicles because it is a commercial area. In the same way, when carrying out the analysis of lead, copper and cadmium in *Tillandsia*, it was observed that the absorbed concentrations are very low, therefore, it can be inferred that high concentrations of these are not generated at the sampling points. metals that come mainly from vehicular traffic.

Keywords: biomonitoring, vehicular traffic, particulate matter, heavy metals, air pollution.

### 3. Introducción

La contaminación del aire es uno de los problemas ambientales que tienen gran relevancia en el ecosistema, y se da cuando, existe la presencia ya sea de, agentes químicos, físicos o biológicos, que alteran notablemente las características naturales de la atmosfera. Las ciudades que tienen poblaciones de 100 mil habitantes o más, por lo general, sobrepasan los estándares de calidad del aire y sus límites permisibles, estos problemas son más críticos en países que se encuentran en vías de desarrollo, puesto que, no poseen las tecnologías necesarias para regular y monitorear constantemente la calidad del aire en las zonas urbanas (WHO, 2016).

El panorama no cambia para América Latina, una región que avanza a paso lento al proceso de globalización buscando un desarrollo sostenible, sin embargo, en algunos estudios realizados en varios países por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización de Naciones Unidas (ONU), indican que al menos 100 millones de personas están expuestas a los altos niveles de contaminación atmosférica, que incluso superan los límites máximos permitidos por la OMS (Vassallo y Bueno, 2019). En estos países que se encuentran en vías de desarrollo, el tráfico vehicular es una de las principales fuentes de emisión de compuestos como: SO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, COV, O<sub>3</sub>, partículas finas como PM 2,5 y PM 10 (Hussein et al., 2020). De todos los compuestos antes mencionados el PM 2,5 causa graves problemas respiratorios e inflamatorios a las vías respiratorias en personas que se encuentren dentro de los grupos de vulnerabilidad como son los niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias (Hernández et al., 2020; Xing et al., 2016).

En el Ecuador, la influencia de diferentes aspectos como en el crecimiento urbanístico no planificado, las industrias, la mala calidad de los combustibles utilizados en los vehículos y la falta de conocimiento por parte de las autoridades, no permiten al país avanzar en cuanto al desarrollo deseado, ni a la mejora tecnológica con redes de monitoreo continuo eficiente que permita dar seguimiento diario a la calidad del aire en las diferentes ciudades del país (Ministerio del Ambiente Ecuador, 2010). Dentro de estas tecnologías, existen técnicas de bajo costo y que implican la manipulación directa de organismos vivos como es el caso del biomonitoreo. Esta técnica puede determinar la concentración de las sustancias tóxicas que se encuentran en el ambiente y también las que se depositan en el cuerpo del organismo vivo (Noriega et al., 2008), sin embargo, en nuestro país no es muy utilizada debido a la falta de información sobre la aplicación de esta metodología.

En la ciudad de Loja existen diversos problemas ambientales, siendo la contaminación atmosférica uno de ellos. Esto debido principalmente al crecimiento del parque automotor y a la polución generada por fuentes difusas (Hernández et al., 2016).

Dentro de las principales fuentes móviles se encuentran los vehículos propulsados por un motor de combustión interna que, por su naturaleza, emiten diversos contaminantes tales como: Pb, Cd, Cu, y Material Particulado (PM), los cuales pueden estar afectando directamente a la calidad del aire de la ciudad, y siendo los principales contribuyentes del cambio climático (Guasgua et al., 2016).

Por otro lado, existen diversos tipos de organismos vasculares que pueden verse afectados también, como es el caso de *Tillandsia usneoides* (L), la misma que, es importante en el ecosistema porque su anatomía le permite absorber y retener en sus partes internas gran cantidad de metales pesados como: Pb, Fe, Zn y compuestos provenientes del tráfico vehicular como por ejemplo PM 2,5, As, Cd, entre otros gases contaminantes (Yauri Molina y Vilca Monrroy, 2021).

Los pocos trabajos relacionados al estudio de la calidad del aire dentro de la ciudad han permitido conocer el impacto causado por la contaminación en la urbe lojana, por ello, esta investigación es necesaria para conocer cómo podemos utilizar nuestros recursos biológicos, de manera que, sirva para obtener un resultado viable a través del tiempo y con ello poder inferir sobre, cómo se encuentra la calidad del aire al existir la influencia del tráfico vehicular.

Esta investigación tiene un alcance correlacional ya que, se busca conocer el grado de asociación entre la incidencia del tráfico vehicular con la composición musgo génica y con la calidad del aire en la ciudad de Loja y con ello inferir a nivel más general como se encuentra la calidad del aire en la ciudad de Loja. A su vez, es trascendental ya que la metodología que se va a emplear no ha sido antes implementada en la región sur del país, y con ello se abre campo para investigaciones futuras en donde se incluyan variables biológicas y ambientales para analizar la contaminación atmosférica obteniendo información precisa y verificable que pueda ser contrastada con otros estudios.

Con estos antecedentes, la presente investigación estuvo orientada a cumplir con los siguientes objetivos:

## **Objetivo general**

Conocer la incidencia del tráfico vehicular en la calidad del aire de la ciudad de Loja mediante el biomonitoreo de *Tillandsia usneoides* (L.).

## **Objetivos específicos**

- Elaborar una línea base para el tráfico vehicular y para biomonitoreo con *Tillandsia usneoides* en la ciudad de Loja.
- Determinar la concentración de Pb, Cd y Cu a través de biomonitoreo con *Tillandsia usneoides*.
- Determinar la concentración de material particulado 2,5 en los diferentes puntos de biomonitoreo.
- Analizar la incidencia del tráfico vehicular en la calidad del aire de la ciudad de Loja.

## 4. Marco teórico

### 4.1. Calidad del aire

Se define la inmisión o calidad del aire como la concentración de contaminante que llega a un receptor, más o menos lejano de la fuente de emisión, una vez transportado y difundido por la atmósfera. La capacidad de la atmósfera para diluir las concentraciones de contaminantes es fundamental para preservar una buena calidad del aire, y esto va a venir marcado principalmente por las condiciones meteorológicas. Así, en una atmósfera estable, se propiciará la acumulación de contaminantes y se facilitará la formación de contaminantes secundarios, mientras que, en una atmósfera inestable, la difusión de los contaminantes será más eficaz debido a las turbulencias. (TROPOSFERA, 2010)

#### 4.1.1. Factores que controlan la distribución de temperatura del aire

La temperatura es la propiedad de los sistemas que establece si están en equilibrio térmico. La sensación de calor o frío al tocar una sustancia depende de su temperatura, de la capacidad de la sustancia para conducir el calor y de otros factores. Cuando se aporta calor a una sustancia, se eleva su temperatura, así los conceptos de temperatura y calor, aunque están relacionados, son diferentes: la temperatura es una propiedad de un cuerpo y el calor es un flujo de energía producido por las diferencias de temperatura.

Algo importante que se estudia de la temperatura, es la capacidad de incidencia que tiene sobre todas las regiones que conforman el planeta y que tipo de distribución espacial ocupa, para analizar y conocer la distribución de temperatura sobre grandes áreas, se usan las isotermas, que son curvas dibujadas sobre un mapa que unen los puntos de igual temperatura.

El cambio de temperatura en una dirección determinada del espacio, se llama gradiente de temperatura y se puede obtener del mapa de isotermas. Analizando los gradientes de temperatura en los mapas, se puede deducir que donde las isotermas están más juntas, el cambio de temperatura en la región considerada es grande, es decir el gradiente de temperatura es grande, y donde están más separadas el cambio o gradiente es pequeño.

Los factores más importantes que controlan la distribución de la temperatura en el aire son:

- **La estación y la latitud**

El principal factor que produce cambios de la temperatura del aire sobre el planeta es la variación en el ángulo de incidencia de los rayos solares, que depende de la latitud. Este factor hace, por ejemplo, que las zonas tropicales sean cálidas debido a que la incidencia de los rayos

UV que se penetran de manera perpendicular en estas zonas y que la temperatura disminuya hacia los polos (Inzunza, 2004).

- **Distribución de tierra y mar**

El aire es calentado desde la superficie terrestre ya que esta absorbe la mayor cantidad de energía procedente del sol y lo mantiene por mayor tiempo que la superficie marina. Por lo tanto, para entender las variaciones en la temperatura del aire debemos conocer las variaciones en las propiedades de calentamiento de los diferentes tipos de superficie, que se exponen al Sol como son: tierra, agua, vegetación, desiertos, hielo, etc. Las diferentes superficies absorben y reflejan cantidades diferentes de radiación solar, que a su vez producen diferentes temperaturas en el aire sobre ellas. Sin embargo, el mayor contraste se da entre las superficies de tierras y aguas; los suelos sólidos se calientan o se enfrían más rápidamente y con temperaturas más altas o bajas dependiendo de la hora del día y la cantidad de absorbanza de estas superficies, mientras que, en las aguas la temperatura en sus superficies aumenta y disminuye más lentamente que la temperatura de las superficies de suelos (Inzunza, 2004).

- **La vegetación sobre la superficie.**

La abundancia de vegetación disminuye el calor y hace que se produzcan más lluvias. La influencia que tiene la temperatura en la vegetación es importante ya que de esto va a depender el desarrollo de los diferentes organismos y el buen funcionamiento de los bosques y sus servicios ecosistematicos. Siendo que cada especie o ecotipo presente una curva de actividad biológica en función de la temperatura. Así también, Alcaraz (2012) señala que la transpiración, el termoperiodismo y la fenología, también pueden verse afectados por la temperatura.

El autor Alcaraz (2012), menciona que las temperaturas bajas pueden originar efectos estimulantes sobre las plantas:

- Evitan el rebrote temprano.
- Estratificación (semillas).
- Estimulan floración en plantas de sitios fríos.

- **La altitud**

La altitud es distancia que existe respecto del nivel del mar (0 metros) a un punto cualquiera de la superficie terrestre, y ésta va a influir sobre la presión atmosférica y la temperatura. Por lo que, a mayor altitud menor presión atmosférica y menor temperatura.

Según Inzunza (2004), la temperatura disminuye  $6.5^{\circ}$  C/Km en la troposfera, por lo tanto, debería esperarse que los lugares más altos tengan menores temperaturas. Sin embargo, no es del todo cierto, ya que la superficie también se calienta, haciendo que en las tierras altas la disminución de temperatura sea menor. Además, con la altura también disminuye la presión y la densidad del aire, haciendo que las capas más altas de la troposfera tengan una menor absorción y reflexión de la radiación solar. Esto aumenta la intensidad de la radiación solar que llega a las tierras altas, produciendo un rápido y más intenso calentamiento durante el día, pero en la noche la menor cantidad de partículas atmosféricas hacen que la radiación terrestre escape al espacio con más facilidad, produciendo una mayor disminución de temperatura durante la noche. Es por eso que, los lugares más altos generalmente tienen una mayor amplitud diaria de temperatura que las tierras más bajas.

- **La topografía**

Las características físicas de la superficie terrestre se denominan rasgos del terreno o topografía. Los rasgos topográficos no sólo influyen en el calentamiento de la Tierra y del aire que la rodea sino también en el flujo del aire. Estos rasgos se pueden agrupar en cuatro categorías: plano, montaña/valle, tierra/agua y áreas urbanas.

Las propiedades térmicas de la Tierra y el agua son radicalmente diferentes, mientras el sol calienta la superficie acuática, se produce la evaporación y cierto calentamiento. En cambio, cuando impacta la superficie de la Tierra, ésta se calienta rápidamente, lo que hace que el aire adyacente se caliente y se haga menos denso lo que le permite elevarse. En el día el aire frío sobre el agua es atraído tierra adentro, y se produce lo que conocemos como "brisa marina". Igualmente sucede por la noche, el aire que está sobre la superficie terrestre se enfría rápidamente debido al enfriamiento radial, que hace que la temperatura disminuya más rápidamente que la del cuerpo adyacente de agua, esto crea un flujo de retorno llamado "brisa terrestre" (APTI, 2011).

- **La cubierta de nubes**

Las observaciones de satélites revelan que casi la mitad del planeta está cubierto de nubes en cualquier instante, por ende, la cobertura nubosa tiene un efecto sobre la distribución de temperatura de un lugar. Las nubes pueden tener un alto albedo y reflejar una gran cantidad de radiación solar incidente, lo que provoca la disminución de temperatura de las capas bajas durante el día. En la noche el efecto es opuesto, porque las nubes absorben la radiación terrestre y la reemiten a la superficie, manteniendo una cantidad de calor cerca de superficie, aumentando

la temperatura respecto a noches despejadas. Para Inzunza (2004), el efecto de la cubierta de nubes es reducir la amplitud diaria de temperatura de un lugar, disminuyendo los máximos en el día y aumentando los mínimos en la noche.

- **Los vientos dominantes**

Se llama viento al movimiento del aire, y es un resultado de las diferencias de presión atmosférica, atribuidas sobre todo a las diferencias de temperatura. Debido a que el calentamiento diferencial en superficie genera las diferencias de presión, la desigual distribución de la radiación solar, junto con las diferentes propiedades térmicas de las superficies terrestres y oceánicas, permiten la formación del viento (Inzunza, 2004).

El autor antes mencionado señala que, el aire fluye desde las áreas de altas presiones a las de baja presión, por lo que, el viento no es más que un intento natural por balancear las diferencias de presión de gran escala, el cual es controlado por una combinación de: las fuertes variaciones de presión, el efecto de la rotación terrestre y la fricción del aire con la superficie. En el caso de que sea una diferencia térmica, lo que ocurre es que, las masas de aire adquieren una temperatura superior a la de su entorno, entonces, su volumen aumenta disminuyendo su densidad. En otras palabras, por efecto flotación, la masa de aire caliente ascenderá, y su lugar será ocupado por otras masas de aire frío, que en su desplazamiento ocasionarán el viento (Rodríguez , Águeda , y Portela Lozano, 2004).

- **Las corrientes marinas**

Las corrientes marinas son movimientos de masas de agua marina en un sentido determinado, producido por factores diversos, como la acción del viento, de las mareas y de las diferencias de densidad (temperatura, salinidad, etc.) de dos masas de agua. Las corrientes oceánicas influyen en la temperatura terrestre. Para López (2018), la corriente de Humboldt que es una de las más importantes a nivel Global, se debe a los efectos combinados del movimiento de rotación de la Tierra y de la fuerza centrífuga de las aguas oceánicas en la zona ecuatorial.

Y que, la corriente del Niño, en cambio se presenta cuando la corriente de Humboldt no llega a emerger y los vientos del norte llevan aguas calientes hacia el sur, entonces, es ahí cuando la corriente del Niño reemplaza a la habitual corriente de Humboldt. Dicha corriente constituye una extensión de la corriente ecuatorial, lo que provoca un ascenso de la temperatura en las aguas superficiales de unos 10 °C.

#### ***4.1.2. Contaminación atmosférica***

La contaminación del aire es actualmente uno de los problemas ambientales más severos a nivel mundial. Ya que está presente en todas las sociedades, independientemente del nivel de desarrollo socioeconómico, y constituye un fenómeno que tiene particular incidencia sobre la salud del hombre (Placeres, Olite, y Toste, 2006).

Los contaminantes del aire son sustancias que, cuando están presentes en la atmósfera afectan de manera adversa la salud de humanos, animales, plantas o vida microbiana; también causa daños en las infraestructuras, deteriorando la estética de una ciudad (J. Glynn Henry; Gary W. Heinke; Héctor Javier Escalona y García, 1999). Los contaminantes producidos por el hombre tienen grandes impactos locales y globales. Esos contaminantes incluyen a la lluvia ácida producida por las industrias, dióxido de carbono que es emitido por los vehículos, clorofluorocarbonos, contaminantes radioactivos de centrales nucleares donde han ocurrido derrames o fugas de gases, metales pesados, organoclorados persistentes como los plaguicidas, y emisiones de contaminantes convencionales de fuentes naturales que se dan a gran escala como erupciones volcánicas y derretimiento de los glaciares.

Otro de los efectos que causa la contaminación del aire está directamente relacionado con problemas en la salud como ya se había mencionado anteriormente, y es que, tras inhalar todos los elementos tóxicos presentes en el ambiente, se puede tener una disminución de la función pulmonar, ya que la constante exposición a estos contaminantes genera enfermedades pulmonares, inflamación de las vías respiratorias, irritación ocular, asma, tos, secreción de la mucosa y bronquitis, que son algunas de las consecuencias de esta contaminación. En el caso más crónico podría desencadenar en la muerte por cardiopatía isquémica, accidentes cerebrovasculares, neumopatías obstructivas, cáncer de pulmón o por último puede causar lesiones agudas en las vías respiratorias de los niños, adultos mayores y personas con padecimientos respiratorios (Cinco Noticias, 2018).

#### ***4.1.3. Fuentes de contaminación***

El continente americano es la región más urbanizada del mundo (United Nations, 2013). El 79% de la población de América Latina y el Caribe vive en pueblos y ciudades con más de 20 000 habitantes. Esto representa una importante demanda de energía, incluyendo la provisión de servicios, la producción y consumo de materiales y bienes, el transporte y la movilidad, todo lo cual contribuye con la contaminación del aire.

El transporte de mercancías y la movilidad humana se basan principalmente en soluciones individuales, que requieren un alto consumo energético, pero poseen una baja eficiencia. Sumado a esto, en gran parte de los países que se encuentran en vías de desarrollo, aún existe una carencia de políticas públicas que se enmarquen en un contexto socioambiental, lo que significa una contribución potencial a la contaminación del aire en entornos urbanos (ECLAC's, 2015).

Las fuentes de contaminación para Mora et al. (2021) se agrupan de la siguiente manera:

- **Fuentes puntuales:** se caracterizan por ser estacionarias o estar en un punto fijo como las plantas de calefacción, las centrales térmicas, las incineradoras de residuos, la industria química, la minería a cielo abierto y la generación de energía nuclear.
- **Fuentes móviles:** éstas abarcan todas las formas de transporte y los vehículos automotores.
- **Fuentes de área:** son aquellas actividades que en conjunto afectan la calidad del aire, como el uso de madera, imprentas, tintorerías o actividades agrícolas.
- **Fuentes naturales o biogénicas:** son resultado de fenómenos de la vida animal y vegetal, como las emisiones producidas por los volcanes, océanos y la erosión del suelo.

En cuanto al origen del contaminante, se distinguen dos tipos según la SEMARNAT (2018):

- **Contaminantes primarios:** provienen directamente de fuentes de emisión, como el plomo, monóxido de carbono, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y material particulado.
- **Contaminantes secundarios:** originados en el aire por la interacción entre dos o más contaminantes primarios o por sus reacciones con otros componentes de la atmósfera.

#### ***4.1.4. Límites máximos permisibles y Normativa ambiental***

En el Anexo 4 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente Norma de Calidad del Aire Ambiente o Nivel De Inmisión (2018), en su Anexo agregado por artículo 4 de Acuerdo Ministerial No. 97, publicado en Registro Oficial Suplemento 387 de 4 de noviembre del 2015; establece los siguientes contaminantes criterio

para calidad del aire, así como también, se fijan las concentraciones máximas para no sobrepasar los límites máximos permisibles, estos compuestos son:

- Partículas Sedimentables.
- Material Particulado de diámetro aerodinámico menor a 10 (diez) micrones. Se abrevia PM 10.
- Material Particulado de diámetro aerodinámico menor a 2,5 (dos enteros cinco décimos) micrones. Se abrevia PM 2,5.
- Dióxido de Nitrógeno NO<sub>2</sub>.
- Dióxido de Azufre SO<sub>2</sub>.
- Monóxido de Carbono CO
- Ozono O<sub>3</sub>

Asimismo, para efectos de esta norma se establecen como contaminantes no convencionales con efectos tóxicos y/o carcinogénicos a los siguientes:

- Benceno (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)
- Cadmio (Cd)
- Mercurio inorgánico (vapores) (Hg)

La Autoridad Ambiental Nacional en coordinación con las Autoridades Ambientales de Aplicación responsable acreditadas al Sistema Único de Manejo Ambiental, desarrollará e implementará a nivel nacional los programas de monitoreo para el cumplimiento de la presente norma.

#### **Normas generales para concentraciones de contaminantes criterio en el aire ambiente**

Para los contaminantes criterio del aire, definidos en el apartado anterior se establecen las siguientes concentraciones máximas permitidas:

- **Partículas sedimentables:** La máxima concentración de una muestra, colectada durante 30 (treinta) días de forma continua, será de un miligramo por centímetro cuadrado (1 mg/cm<sup>2</sup> x 30 d).
- **Material particulado menor a 10 micrones (PM 10):** El promedio aritmético de la concentración de PM 10 de todas las muestras en un año no deberá exceder de cincuenta microgramos por metro cúbico (50 ug/m<sup>3</sup>). El promedio aritmético de monitoreo continuo durante 24 horas, no deberá exceder de cien microgramos por metro cúbico (100 ug/m<sup>3</sup>), Se considera sobrepasada la norma de calidad del aire para material

particulado PM 10 cuando el percentil 98 de las concentraciones de 24 horas registradas durante un periodo anual en cualquier estación monitorea sea mayor o igual a (100 ug/m<sup>3</sup>).

- **Material particulado menor a 2,5 micrones (PM 2,5):** El promedio aritmético de la concentración de PM 2,5 de todas las muestras en un año no deberá exceder de quince microgramos por metro cúbico (15 ug/m<sup>3</sup>). El promedio aritmético de monitoreo continuo durante 24 horas, no deberá exceder de cincuenta microgramos por metro cúbico (50 ug/m<sup>3</sup>). Se considera sobrepasada la norma de calidad del aire para material particulado PM 2,5 cuando el percentil 98 de las concentraciones de 24 horas registradas durante un período anual en cualquier estación monitorea sea mayor o igual a (50 ug/m<sup>3</sup>)
- **Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>):** La concentración SO<sub>2</sub> en 24 horas no deberá exceder ciento veinticinco microgramos por metro cúbico (125 ug/m<sup>3</sup>), la concentración de este contaminante para un periodo de diez minutos, no debe ser mayor a quinientos microgramos por metro cúbico (500 ug/m<sup>3</sup>). El promedio aritmético de la concentración de SO<sub>2</sub> de todas las muestras en un año no deberá exceder de sesenta microgramos por metro cúbico (60 ug/m<sup>3</sup>).
- **Monóxido de carbono (CO):** La concentración de monóxido de carbono de las muestras determinadas de forma continua, en un período de 8 (ocho) horas, no deberá exceder diez mil microgramos por metro cúbico (10 000 ug/m<sup>3</sup>) no más de una vez al año. La concentración máxima en una hora de monóxido de carbono no deberá exceder treinta mil microgramos por metro cúbico (30 000 ug/m<sup>3</sup>) no más de una vez al año.
- **Ozono:** La máxima concentración de ozono, obtenida mediante muestra continua en un período de (8) ocho horas, no deberá exceder de cien microgramos por metro cúbico (100 ug/m<sup>3</sup>), más de una vez en un año.
- **Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>):** El promedio aritmético de la concentración de Dióxido de nitrógeno, determinado en todas las muestras en un año, no deberá exceder de cuarenta microgramos por metro cúbico (40 ug/m<sup>3</sup>). La concentración máxima en (1) una hora no deberá exceder doscientos microgramos por metro cúbico (200 ug/m<sup>3</sup>).

Los valores de concentración de contaminantes criterio del aire, establecidos en esta norma, así como los que sean determinados en los programas públicos de medición, están sujetos a las condiciones de referencia de 25 °C y 760 mm Hg.

La Autoridad Ambiental Nacional establecerá la frecuencia de revisión de los valores descritos en la presente norma de calidad de aire ambiente. La Autoridad Ambiental de Aplicación responsable acreditada ante el Sistema Único de Manejo Ambiental utilizará los valores de concentraciones máximas de contaminantes del aire ambiente aquí definidos, para fines de elaborar su respectiva ordenanza o norma sectorial.

## **4.2. Biomonitorio**

La monitorización de los contaminantes atmosféricos es fundamental para determinar la calidad del aire que respiramos. Este seguimiento se suele realizar mediante procedimientos fisicoquímicos, Baldellou et al. (2018) mencionan que las últimas décadas ha cobrado gran importancia el uso de organismos. Este proceso, conocido como biomonitorio, es importante para evaluar no solo la concentración de ciertos contaminantes en la atmósfera, sino también su impacto en los organismos vivos

### **4.2.1. Métodos de biomonitorio**

El uso de bioindicadores para evaluar diversos factores ambientales está cobrando gran relevancia dentro del campo científico y académico, particularmente por los efectos que se pueden notar en cuanto a efectos que produce la contaminación en general. En este caso el término monitoreo biológico o biomonitorio (que, en el caso del aire, implica generalmente el uso de plantas) abarca una gran cantidad de enfoques de muestreos y análisis con grados muy diferentes de complejidad y desarrollo (PNUMA-ONU, 2002).

Entre los principales métodos, la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (2002), ha incluido dentro de los programas de la ONU para el desarrollo y prevención de la contaminación los siguientes:

- El uso de superficies vegetales como receptoras de contaminantes (por ejemplo, plomo en perejil, Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) en musgo). Esencialmente, las plantas son muestras que se recolectan y analizan en el laboratorio utilizando métodos clásicos.
- Aprovechar la capacidad de la planta para absorber y acumular contaminantes o sus metabolitos en los tejidos (p. ej., picea para azufre total, fluoruro, azufre y algunos metales pesados en el pasto). También en este caso, el tejido vegetal debe recolectarse y analizarse utilizando métodos clásicos.

- Evaluar el impacto de los contaminantes en el metabolismo de las plantas o la información genética (p. ej., el ozono en los cloroplastos de las piceas). Pero la recopilación y el análisis requieren técnicas muy sofisticadas.
- Evaluar el impacto de los contaminantes en la apariencia de las plantas (p. ej., nicotiana o plantas de tabaco para el ozono, líquenes para el dióxido de azufre). La evaluación puede ser realizada por expertos en el campo sin análisis a posteriori.
- Analizar la distribución de algunas plantas específicas como indicador de la calidad general del aire (p. ej., tipo y distribución de líquenes para evaluar el impacto fitotóxico general de la contaminación del aire). La evaluación puede ser realizada por expertos en el campo y no se requiere análisis (PNUMA-ONU, 2002).

#### **4.2.2. *Tillandsia usneoides* como bioindicador de la calidad del aire**

Entre los organismos más usados, como bioindicadores y bioacumuladores, se encuentra los musgos, líquenes y diferente tipo de organismos vasculares como la *T. usneoides*; Noriega (2008) cita que las técnicas del biomonitoreo de un producto biológico dado se obtienen analizando la variación de la morfológica, fisiológica, genética de los organismos o a su vez midiendo las concentraciones de sustancias en los mismos.

El bioindicador *Tillandsia usneoides* pertenece a la familia de las bromeliáceas, usnea es una especie de liquen de donde *Tillandsia* toma su nombre. Es una planta epifita, que vive en arboles u otra clase de sustratos inertes, absorbiendo agua y nutrientes directamente del aire. En relación a esto “debido a su morfología y características fisiológicas, esta especie acumula contaminantes presentes en la atmosfera” (Minelli et al., 1996, como se citó en Figueiredo et al, 2007).

Dentro del género, *Tillandsia* ha sido utilizada para biomonitoreo en diferentes países, como por ejemplo en Brasil, fue empleada para biomonitorear la contaminación atmosférica de mercurio, en Costa Rica para determinar plomo, cadmio y cobre (Minelli et al., 1996; Figueiredo et al, 2007, como se citó en Cardona et al., 2008). Otro estudio, realizado por Cardona et al. (2008) explica el uso de *Tillandsia usneoides* para el biomonitoreo de metales pesados en el Valle de Aburrá, los autores mencionan que, los metales estudiados (Cu, Fe, Ca, Mg) no se encuentran en grandes concentraciones en las zonas más altas y alejadas del río, y que, esto depende de la dirección del viento, ya que, en el Valle de Aburrá las montañas y la trayectoria del río contribuyen a que la dirección del viento sea cambiante en un mismo período, dependiendo de la posición que se encuentre dentro del Valle.

También es importante mencionar que *T. usneoides* mostró ser un biomonitor adecuado para Pb y Ca, tal como lo mencionan Beltrán-Hernández et al. (2012) en su estudio realizado en Tlaxcoapan, Hidalgo, donde indicaron que aunque a nivel macroscópico la planta no sufrió daños visibles debido a la deposición atmosférica, la correlación entre los parámetros biológicos medidos podría indicar un posible estrés metálico frente a los contaminantes.

#### **4.2.3. Características biológicas de *Tillandsia usneoides*.**

*Tillandsia usneoides* (L.) L., es muy parecido al nombre que evoca la especie *usnea*, un líquen. Aunque *Tillandsia* no guarda relación biológica con *usnea*; sino que es una fanerógama de la familia de las bromeliáceas, estos organismos suelen crecer en árboles que se encuentran próximos los cursos de agua o en lugares con bastante altura a media sombra o a plena irradiación directa. Está en toda América desde el sudeste de EE. UU. a Argentina y Chile, creciendo en clima tibio, y preferentemente con alta humedad (Elias y Aoyama, 2019).

La planta tiene un tallo flexible con hojas delgadas, curvadas o arremolinadas, de 2-6 cm de largo y 1 mm de espesor, que crece vegetativamente encadenándose formando estructuras colgantes de 1-2 m de longitud aproximadamente. Esta especie carece de raíces y posee flores demasiado pequeñas y raramente florece. El medio de propagación es a través del viento, lo que le permite propagarse sobre otros árboles, también son transportados por aves para la fabricación de sus nidos (Schlesinger y Marks, 1977).

Esta especie es abundante y de amplia distribución espacial, y se encuentra desde Estados Unidos hasta Argentina, excepto en bosques húmedos, que, si bien requieren humedad, también requieren de luz solar y movimiento de aire. Aunque no extrae nutrientes de la planta en la que se encuentra, su intenso crecimiento puede bloquear el paso de la luz, reduciendo o incluso interrumpiendo la actividad fotosintética, o incluso provocando la muerte de su hospedador (Lorenzi, 2000). Por otro lado, la actividad de *T. usneoides* puede verse afectada también por la presencia de metales procedentes del suelo o por los emitidos por el tráfico vehicular, causando un estrés metálico, donde compuestos como el plomo, el manganeso o el aluminio pueden evitar el transporte de agua y nutrientes hacia la parte interna de la especie, es por ello que, son organismos altamente sensitivos, por lo que, pueden ser un buen indicador de la calidad del aire (Beltrán, 2012).

Se estudió su composición química, en donde, Vieira y Kaplan (2011) revisaron la química y farmacología de esta especie, destacando sus efectos analgésicos, hipoglucemiante, anticolinérgico e hipoglucemiante, anticolesterolémico, antiviral, antioxidante y antitumoral.

En el estudio de pruebas controladas, Faller et al. (2017, como se citó en Elias y Aoyama, 2019) encontraron que los extractos metabólicos arrojaron resultados significativos en la actividad antibacteriana, mostrando el potencial de *Tillandsia* para el desarrollo de nuevos medicamentos.

### 4.3. Material Particulado

#### 4.3.1. Definición

Se denomina material particulado a una mezcla de partículas líquidas y sólidas, de sustancias orgánicas e inorgánicas, que se encuentran en suspensión en el aire. El material particulado forma parte de la contaminación del aire. Su composición es muy variada y podemos encontrar, entre sus principales componentes, sulfatos, nitratos, el amoníaco, el cloruro sódico, el carbón, el polvo de minerales, cenizas metálicas y agua. Dichas partículas además producen reacciones químicas en el aire. Se cataloga en función de su tamaño y, en el ámbito de la calidad del aire, hablamos de partículas PM 10, que serían las de mayor tamaño, cuyo diámetro aerodinámico teórico sería de 10  $\mu\text{m}$  y las partículas finas conocidas como PM 2.5 cuyo diámetro sería de 2.5  $\mu\text{m}$ . (Fundacion para la Salud Geoambiental, 2013)

- **PM-2.5:** La materia particulada o PM 2.5, son partículas muy pequeñas en el aire que tiene un diámetro de 2.5 micrómetros es menos que el grosor de un cabello humano. El material particulado es uno de los seis criterios de contaminantes del aire de la Unión Soviética, ya que es una mezcla que puede incluir sustancias químicas orgánicas, polvo, hollín y metales. De donde se conoce que estas partículas provienen de los automóviles, camiones, fábricas, quema de madera y otras actividades (EPA, 2017).
- **PM-10:** PM 10 describe partículas inhalables, con diámetros que generalmente son de 10 micrómetros y más pequeños. Bajo la Ley de Aire Limpio, la EPA establece y revisa los estándares nacionales de calidad del aire para PM. Los monitores de calidad del aire miden las concentraciones de PM en todo el país para que los organismos de la EPA, usen estos datos y con ello garantizar que el PM en el aire se encuentre en niveles que protejan la salud pública y el medio ambiente. A nivel nacional, las concentraciones promedio de PM 10 han disminuido a lo largo de los años. (EPA, 2017)

Un estudio realizado por Martins et al. (2018) coinciden que en horas pico como es al mediodía, las actividades vehiculares y las emisiones de carbón negro que se encuentra presente en el hollín y en el PM aumentan y con ello la calidad del aire en estos horarios se empeora.

#### ***4.3.2. Límites máximos permisibles y Normativa ambiental***

En el Anexo 4 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente Norma de Calidad del Aire Ambiente o Nivel De Inmisión (2018), en su Anexo agregado por artículo 4 de Acuerdo Ministerial No. 97, publicado en Registro Oficial Suplemento 387 de 4 de noviembre del 2015, se establecen los límites máximos permisibles para contaminantes criterio, el cual menciona lo siguiente para material particulado PM 10 y PM 2.5 con sus concentraciones máximas permisibles:

**Material particulado menor a 10 micrones (PM 10):** El promedio aritmético de la concentración de PM 10 de todas las muestras en un año no deberá exceder de cincuenta microgramos por metro cúbico (50 ug/m<sup>3</sup>). El promedio aritmético de monitoreo continuo durante 24 horas, no deberá exceder de cien microgramos por metro cúbico (100 ug/m<sup>3</sup>), Se considera sobrepasada la norma de calidad del aire para material particulado PM 10 cuando el percentil 98 de las concentraciones de 24 horas registradas durante un periodo anual en cualquier estación monitora sea mayor o igual a (100 ug/m<sup>3</sup>).

**Material particulado menor a 2,5 micrones (PM 2,5):** El promedio aritmético de la concentración de PM 2,5 de todas las muestras en un año no deberá exceder de quince microgramos por metro cúbico (15 ug/m<sup>3</sup>). El promedio aritmético de monitoreo continuo durante 24 horas, no deberá exceder de cincuenta microgramos por metro cúbico (50 ug/m<sup>3</sup>). Se considera sobrepasada la norma de calidad del aire para material particulado PM 2,5 cuando el percentil 98 de las concentraciones de 24 horas registradas durante un período anual en cualquier estación monitora sea mayor o igual a (50 ug/m<sup>3</sup>)

#### ***4.3.3. Tipos de muestreo***

El muestreo representativo juega un papel muy importante en el análisis de la calidad y utilidad de los datos. El muestreo representativo debe tener un alto nivel de precisión y exactitud para garantizar que una muestra o grupo de muestras sea representativa y proporcione con precisión las características del campo y que los resultados sean reproducibles. Los diseños de muestreo pueden ser (i) experimentales (no probabilísticos) o (ii) aleatorios simples, estratificados o sistemáticos (probabilísticos). (INECC, 2007)

- **Muestreadores pasivos:** Los muestreadores pasivos se utilizan para evaluar ciertas sustancias, cuya cuantificación no es factible desde el punto de vista económico ni operativo, los dispositivos de muestreadores activos son mucho más costosos cuando se

usan con bombas, en cambio, los muestreadores pasivos se pueden usar en ambientes interiores como hogares, bibliotecas, oficinas, etc. No obstante, también se usan en ambientes exteriores para analizar la contaminación por COVs, O<sub>3</sub>, HAP y Polvos sedimentables (Perez, Gonzalez, & Miñana, 1993).

- **Muestreador activo:** Estos se clasifican en continuos y discontinuos, los primeros presentan los datos que se registran durante largos periodos de tiempo y dan información en tiempo real, además son más costosos y requieren de un gran asesoramiento para su uso. Los segundos en cambio tienen bajo coste y son fáciles de operar, lo interesante es que estos cuentan con una base de datos históricos, y recopilan información diaria, lo negativo de estos instrumentos es que requieren un trabajo intensivo en donde se requieren análisis de laboratorio (Martinez & Díaz., 2004).
- **Muestreador de aire de bajo volumen:** Los muestreadores de bajo y medio volumen LVS y MVS recogen partículas finas en filtros de muestreo. Para ello, una bomba de vacío aspira el aire ambiente y el muestreador fracciona las partículas finas transportadas por el aire en una entrada de muestreo (Direct Industry, 2019).
- **Muestreador de aire de alto volumen:** Un muestreador de alto volumen (muestreador activo) es un equipo que succiona una cantidad medible de aire ambiente hacia una caja de muestreo a través de un filtro durante un periodo de tiempo conocido, generalmente 24 horas. El filtro es pesado antes y después para determinar el peso neto ganado. El volumen total de aire muestreado se determina a partir de la velocidad promedio de flujo y el tiempo de muestreo. La concentración total de partículas en el aire ambiente se calcula como la masa recolectada dividida por el volumen de aire muestreado, ajustado a las condiciones de referencia. Existen dos muestreadores de este tipo que se diferencian en su controlador de flujo, pueden ser de sistema MFC (controlador de flujo de tipo másico) o VFC (controlador de flujo de tipo volumétrico) (Ministerio de Ambiente Vivivenda y Desarrollo Territorial, 2008)

Para el muestreo de material particulado que es emitido principalmente por el tráfico vehicular es importante según Hernández et al., (2020); observar que la concentración de este contaminante va a depender de la cobertura vegetal y de la hora en la que se realiza el muestreo, teniendo así mayores concentraciones para PM 2,5 en horarios pico en zonas donde exista

menos vegetación, y menores concentraciones en zonas con mayor cobertura vegetal y menos incidencia del tráfico vehicular.

#### **4.3.4. Sensores en Arduino UNO**

“Los avances en la tecnología de los sensores en la última década han permitido la aparición de dispositivos en miniatura, disponibles en el mercado y de bajo coste para la vigilancia de la contaminación atmosférica” (Kumar et al., 2015). La asequibilidad con la que las personas pueden adquirir monitores de calidad del aire ha llevado al desarrollo de múltiples proyectos de crowdsourcing que tienen como objetivo aumentar la densidad de redes de monitorización en regiones que actualmente carecen de equipos de vigilancia de la calidad del aire (Chen et al., 2017).

En varios estudios se ha examinado el rendimiento de los sensores de bajo coste disponibles en el mercado, incluidas las pruebas de laboratorio y las comparaciones sobre el terreno con métodos de referencia en estaciones de control de la calidad del aire reglamentarias, en donde si bien un pequeño porcentaje de modelos han indicado correlaciones adecuadas entre los sensores y los instrumentos de referencia, aún existe un consenso en que la generación actual de sensores de bajo coste necesita más mejoras para alcanzar la precisión de los monitores de referencia (Budde et al., 2014; Hall et al., 2014; Clements et al., 2017).

Dado que la mayoría de los sensores PM de bajo costo calculan la concentración según el principio de dispersión de la luz, las variables ambientales como la temperatura y la humedad relativa (HR) pueden distorsionar significativamente sus mediciones. Los estudios realizados hasta la fecha han demostrado que el rendimiento del sensor se degrada en entornos con  $HR \geq 75\%$ , principalmente debido al crecimiento higroscópico de partículas después de la condensación de las gotas de agua (Crilley et al., 2018). A pesar de estas limitaciones, la fusión de sensores con tecnologías de Internet en los últimos años ha aumentado el potencial de monitoreo de sensores de bajo costo y ha brindado una oportunidad para un progreso significativo en el desarrollo de ciudades inteligentes.

En el caso de la plataforma electrónica de código abierto Arduino los usuarios no necesitan dominar conocimientos profesionales de programación de hardware y software, para crear o diseñar su propio sistema de pruebas. En la actualidad, hay muchos modelos de placa de hardware Arduino, principalmente Arduino-uno, Arduino-nano, Arduino-LilyPad, ArduinoMega2560, Arduino-due, Arduino-Leonardo, Arduino-cloud [4]. Junto con estas

plataformas trabajan distintos sensores y equipos de interfaz que están conectados en forma de pila (Ding et al., 2021).

El principal sensor que se utiliza para la recolección de material particulado se compone de hardware (placa de hardware Arduino) y software (Arduino IDE), el cual presenta la característica de su sistema de código abierto. Ding et al. (2021) mencionan que este sensor de polvo Sharp GP2Y1010AUOF tiene un tubo emisor de luz infrarroja y un transistor fotoeléctrico, el mismo que trabaja bajo el principio de fotosensibilidad y depende de la altura del pulso de salida para determinar la concentración de partículas.

#### **4.4. Polvo Sedimentable**

##### ***4.4.1. Definición***

Estas partículas contaminantes son generadas por procesos extractivos, transporte, fundición, refinación, comercialización, quema de combustibles fósiles, emisiones volcánicas, polen de la fase de floración de las plantas, etc. De las diferentes fracciones de partículas, las más finas son las más dañinas por su rápida penetración y permanencia en el sistema respiratorio, específicamente a nivel de los alvéolos pulmonares (Ávila, 2016).

Según Ávila (2016), el polvo atmosférico sedimentable (PAS) está constituido por partículas contaminantes sólidas de un diámetro equivalente mayor o igual a 10 micras ( $D \geq 10 \mu$ ). Este tamaño y peso que está dentro de la influencia de la fuerza de atracción gravitatoria terrestre, hace que se sedimenten y se depositen en forma de polvo en las diferentes superficies como: edificios, áreas verdes, avenidas y calles con o sin asfalto, y posteriormente, éstos vuelven a ser inyectados al aire por los llamados flujos turbulentos de las zonas urbanas. Los polvos sedimentables, son partículas que por su peso tienden a precipitarse con facilidad, razón por lo cual permanecen suspendidas en el aire en periodos cortos de tiempo.

##### ***4.4.2. Límite máximo permisible y Normativa ambiental***

En el Anexo 4 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente Norma de Calidad del Aire Ambiente o Nivel De Inmisión (2018), en su Anexo agregado por artículo 4 de Acuerdo Ministerial No. 97, publicado en Registro Oficial Suplemento 387 de 4 de noviembre del 2015, se establecen los límites máximos permisibles para contaminantes criterio, en este caso para polvo sedimentable, junto con sus concentraciones máximas permisibles:

“La máxima concentración de una muestra, colectada durante 30 (treinta) días de forma continua, será de un miligramo por centímetro cuadrado ( $1 \text{ mg/cm}^2 \times 30 \text{ d}$ )”

#### **4.4.3. Técnicas de muestreo**

Para recoger el polvo sedimentable, Huallaro et al. (2008) señalan dos métodos totalmente diferentes:

- **Muestreo en colectores:** un procedimiento habitual para medir el polvo sedimentable (polvo depositado) es el método Bergerhoff, que consiste en recoger durante  $30 \pm 2$  días toda la precipitación atmosférica (precipitación seca y húmeda) en colectores situados a 1,5 - 2,0 metros por encima del nivel del suelo (precipitación aparente). A continuación, los colectores se envían laboratorio y se preparan mediante filtrado, evaporación del agua, secado y pesado. El resultado se calcula en función de la superficie del colector y el tiempo de exposición ( $\text{g/m}^2/\text{día}$ ). El límite relativo de detección es de  $0,035 \text{ g/m}^2/\text{día}$ .
- **Método pasivo:** este método se caracteriza porque no utilizan compresores para aspiración de aire, sino que recogen contaminantes específicos en jarras, botellas por adsorción y absorción sobre sustratos químicos seleccionados. Después de la exposición durante un período de muestreo apropiado (que va desde unos pocos días hasta un mes), las muestras se devuelven al laboratorio, donde se recuperan los contaminantes y luego se analizan cuantitativamente.
- **Muestreo en superficies adhesivas:** para este muestreo se utiliza un equipo llamado aparato de Liesegang-Löbner. Este tipo de muestreos permite la recolección de polvo depositado sobre láminas adhesivas.

Entre los muestreos antes mencionados, no hay duda que, una de las ventajas de los métodos de sistemas pasivos, es que nos permiten obtener datos aproximados para poder inferir sobre cómo se encuentra la calidad del aire en una zona, agregando también que, son equipos de bajo costo de adquisición y analítico, que tienen gran sencillez en su manipulación y además son versátiles de transportar (Huallaro et al., 2008).

#### **4.4.4. Colectores pasivos.**

Estos dispositivos de toma de muestras por lo general son en forma de tubo o discos, estos ofrecen un método simple y eficaz en función de los costos para realizar el sondeo de la calidad del aire en un área determinada. A través de la difusión molecular a un material absorbente para contaminantes específicos, se recoge una muestra integrada durante un

determinado periodo (que generalmente varía entre una semana y un mes). Los bajos costo por unidad permiten muestrear en varios puntos del área de interés, lo cual sirve para identificar los lugares críticos donde hay una alta concentración de contaminantes, como las vías principales o las fuentes de emisión, y donde se deben realizar estudios más detallados. Para aprovechar al máximo esta técnica, se debe contar con un diseño cuidadoso del estudio y vigilar los procedimientos de aseguramiento y control de la calidad seguidos en el laboratorio durante el análisis de la muestra (DIGESA, 2005).

#### ***4.4.5. Método gravimétrico***

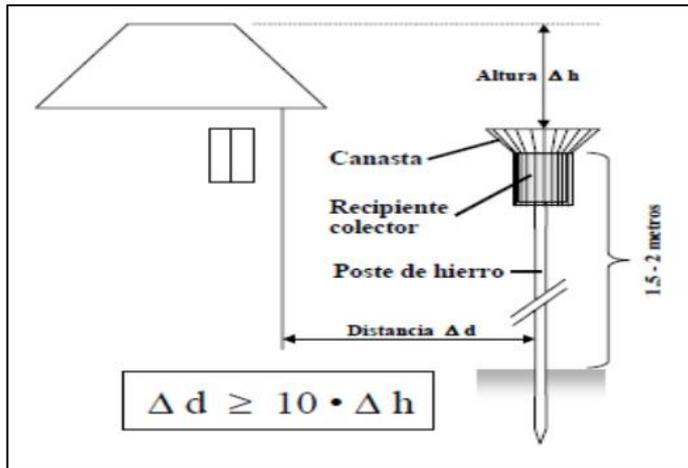
Para la detección del polvo sedimentable se utiliza un método pasivo, conocido como el método gravimétrico (jarras), que consiste en dejar al aire libre un frasco abierto de boca ancha (tubo plástico de aproximadamente 20 centímetros de alto y 6 pulgadas de diámetro), por un tiempo determinado, el mismo debe contener un filtro para poder analizarlo en el laboratorio. Una vez cumplido el tiempo de recolección, se traslada el frasco con el filtro al laboratorio donde se separa y pesa el material sólido recolectado (Pablo et al., 2001).

La medición de las partículas sedimentables según los autores Pablo et al., (2001), permite establecer variaciones entre distintos puntos de una misma localidad y entre las que pueden ocurrir en un mismo lugar en diferentes épocas del año. Debido a que los resultados obtenidos son promedios, no detecta los valores máximos ocasionales que pueden presentarse. La infraestructura que se emplea es mínima y consiste básicamente en un recipiente colector plástico y una canasta de soporte que funciona como contenedor del frasco. La canasta se coloca encima de un poste a 1.5 hasta 3 metros sobre nivel del suelo, como se puede apreciar en la figura 1.

#### ***4.4.6. Desventajas de los colectores pasivos***

Dentro de las desventajas de los colectores pasivos tenemos:

- No ha sido probado para algunos contaminantes.
- Sólo suministran promedios mensuales y semanales.
- Requieren mano de obra intensiva para su funcionamiento y el consiguiente análisis.
- No existe un método de referencia para monitorear el cumplimiento.
- Lenta generación de datos



**Figura 1.** Jarra de muestreo de partículas sedimentables  
 José Huallaro B., (2005)

Ademas de las anteriores desventajas, es importante tomar en cuenta lo siguiente: Al usar papel tipo filtro aumenta el margen de error al pesar, y los tubos tienen que ser reemplazados cada 6 días. Hay que tomar en cuenta que los papeles tipo filtro no son reutilizables, y la venta no es en cualquier establecimiento, sino que debe estar certificado para dicha venta. En lugares donde existan muchas lluvias (120 mm. /mes) no es posible su implementación sin algunos acondicionamientos previos, elevando así el costo y manipulación. (José Huallaro B., 2005)

## 5. Metodología

A continuación, se presenta la metodología que se planteó para cumplir con lo establecido en cada objetivo específico, tomando en cuenta, un diseño de muestreo diferente para cada monitoreo realizado. Asimismo, en esta sección se detallaron los criterios de selección de las metodologías planteadas, de tal forma, que pudiéramos tener información precisa y detallada sobre cómo se encontraba la calidad del aire en la ciudad de Loja, y si estaba siendo influenciada por el tráfico vehicular.

### 5.1. Área de estudio

#### Ubicación geográfica y política

La ciudad de Loja perteneciente a la provincia de Loja, se ubica entre las latitudes Sur:  $03^{\circ}19'49''$  y  $04^{\circ}45'00''$ . Posee una superficie aproximada de  $285.7 \text{ km}^2$ . A nivel cantonal tiene una extensión de  $18.009,92 \text{ ha}$  que representa un  $9,52 \%$  del territorio nacional (PDOT-L, 2019).

#### Límites

La provincia de Loja se encuentra limitada de la siguiente forma; al Norte con el Azuay y El Oro, al Sur y Oeste con Perú y al Este con Zamora Chinchipe.

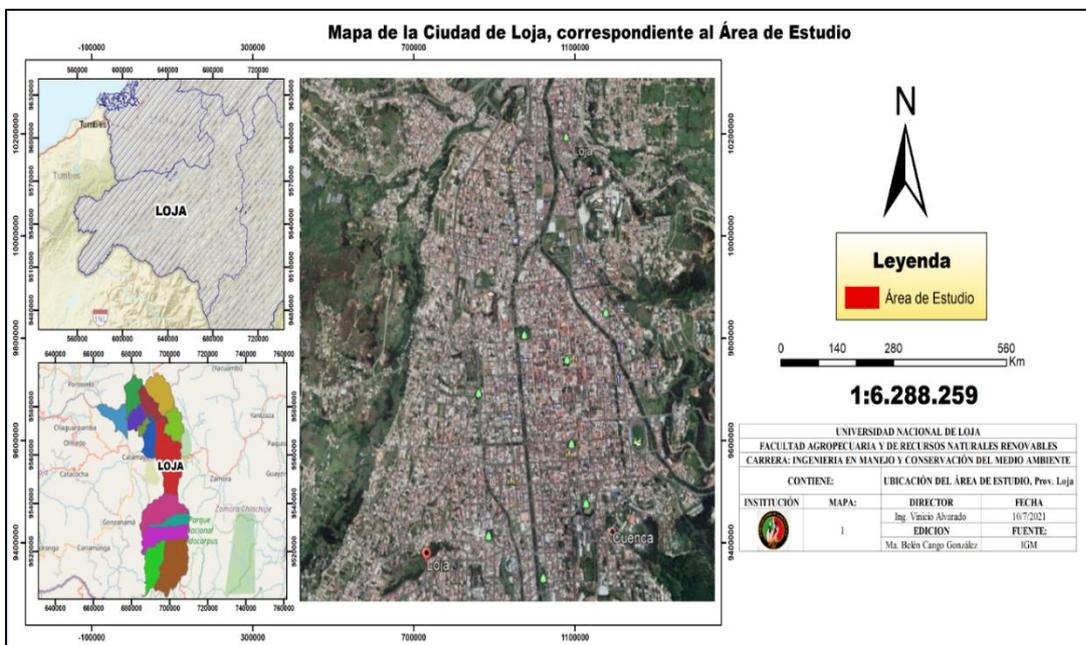


Figura 2. Mapa del área de estudio

La ciudad de Loja está conformada por 6 parroquias (El valle, El sagrario, San Sebastián, Sucre, Carigán y Punzara), las mismas que están divididas en 13 zonas distribuidas en 47 barrios, con una extensión de 2.968 Km<sup>2</sup>.

### **Clima**

El clima es uno de los factores ecológicos que incide mayormente en las características morfológicas, distribución geográfica y comportamiento funcional de las especies vegetales y animales.

El cantón Loja tiene un tipo de clima Ecuatorial Mesotérmico semi – húmedo, se encuentra a una altura de 2.100 m.s.n.m. Los factores que lo originan son especialmente la latitud y el relieve, la zona de convergencia intertropical (ZCIT), el efecto de la interacción Océano Pacífico – atmósfera (fenómeno El Niño Oscilación del Sur y Corriente fría de Humboldt) y la cubierta vegetal (GAD Loja, 2014).

Posee una temperatura media del aire de 16 °C y una lluvia anual de 900 litros por metro cuadrado. La variación anual de la temperatura del clima es de 1,5 °C, pero las extremas temperaturas oscilan entre 0,3 °C y 28 °C. En cuanto a, la humedad relativa promedio, existe al 75 %, con fluctuaciones extremas entre el 69 % y el 83 %. El brillo del sol (insolación) en el valle de Loja presenta una suma plurianual de cerca de 1600 horas, y el valor es aún mayor en la segunda mitad del año (GEO-LOJA, 2007).

En cuanto a la velocidad del viento, según la escala de Beaufort, la velocidad promedio del viento por hora en Loja tiene variaciones estacionales *considerables* en el transcurso del año (Weather Spark, 2016).

La parte más ventosa del año dura de 3 a 4 meses, del 31 de mayo al 13 de septiembre, registrándose velocidades promedio de más de 9,5 km/h, lo que nos indica vientos calmados. Dentro de este periodo de tiempo, el mes donde se han registrado velocidades de viento un poco más fuertes de tipo ventolinas, ha sido en julio con una velocidad promedio de 13 km/h.

El tiempo más calmado del año donde existe mayor estabilidad atmosférica dura cerca de 9 meses, del 13 de septiembre al 31 de mayo. Siendo febrero el mes con vientos a una velocidad promedio de 5,8 km/h.

A su vez la dirección del viento en el cantón es Sur Oeste la mayor parte del día. Por otro lado, las estaciones climáticas se encuentran definidas de la siguiente manera (Weather Spark, 2016);

La temporada templada dura 5,3 meses, del 22 de noviembre al 1 de mayo, y la temperatura máxima promedio diaria es más de 20 °C. El mes más cálido del año en Loja es marzo, con una temperatura máxima promedio de 21 °C y mínima de 11 °C.

La temporada fría en Loja dura 2,1 meses, del 14 de junio al 17 de agosto, y la temperatura máxima promedio diaria es menos de 18 °C. Siendo el mes más frío del año julio, con una temperatura mínima promedio de 9 °C y máxima de 17 °C.

### **Densidad poblacional**

La ciudad de Loja tiene una población de 170.280 habitantes del área urbana, de los cuales 88.805 son mujeres y 81.475 habitantes son hombres, la mayor parte de la población se concentra en edades jóvenes (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2010).

Es importante tomar en cuenta las proyecciones en cuanto al aumento de la población, puesto que es uno de los factores claves en la contaminación ambiental. Es así que, cuando se expanden las urbanizaciones las personas requieren de un medio de transporte que les permita cumplir con sus actividades diarias, y bajo este contexto, aumentará a su vez, el parque automotor en la ciudad ocasionando grandes impactos en la calidad del aire debido a los compuestos que son emanados por los tubos de escape.

## **5.2. Establecimiento de la línea base para el tráfico vehicular y para biomonitoreo con *Tillandsia usneoides* en la ciudad de Loja**

Para el cumplimiento de este objetivo, se realizó un diseño estratificado-sistemático, de esta manera, se pudo establecer sitios de muestreo en donde, las variables de estudio pudieron correlacionarse para inferir más a profundidad de cómo se encontraba la calidad del aire en la ciudad de Loja.

### **5.2.1. Línea Base**

Esta sección permitió determinar los sitios de monitoreo con base a, las variables de estudio que fueron: tráfico vehicular, presencia de la especie bioindicadora y las condiciones meteorológicas de la zona.

#### **Carga vehicular**

Para la carga vehicular, los puntos de monitoreo fueron escogidos en relación a la presencia de la especie bioindicadora, y a su vez, se tomó en cuenta el criterio de zonas de influencia directa como centro educativos, parques, centros comerciales y hospitales, es así que, los sitios que se definieron fueron los siguientes: a) zona norte (Las Pitas, La Paz y

Walkswagen), b) zona centro (La Salle, Hospital del Día y Mercado Mayorista), c) zona sur (Clínica San Pablo, Parque Lineal y Parque Infantil)

Una vez seleccionados los puntos de interés donde se presume existe mayor afluencia de tráfico vehicular y por ende, una relación directa en la calidad del aire, se procedió a escoger una zona de control, basado en el criterio que, debe ser una zona donde la concurrencia de tráfico vehicular sea mínima y que, además, cuente con la presencia de *Tillandsia*, es por ello que, ésta estuvo definida por tres puntos de control los cuales fueron: Zamora Huayco Alto, Colegio Liceo de Loja o Captaciones del Carmen y La Reserva del Madrigal.

A su vez, para llevar a cabo este monitoreo se estableció el siguiente cronograma de frecuencia para la recolección de datos, tomando principalmente las horas pico del día; de 8h00 a 10h00 am, de 12h50-14h50 pm y de 18h00-20h00 pm, en intervalos de tiempo de 1 minuto por tres veces, dejando 1 minuto intermedio de descanso. En cuanto a, los días establecidos para el muestreo, fueron los días lunes, miércoles, viernes y sábados (se incluye el sábado puesto que la afluencia de tráfico vehicular en la ciudad es diferente que el resto de la semana, ya que las personas lo aprovechan para realizar distintas actividades cotidianas). Véase en anexo 1.

Otro factor importante, que ayudó en este estudio fue, la determinación de porcentaje de los principales medios de movilización en la ciudad, es por ello que, se clasificó en base a información secundaria obtenida de un estudio realizado por el Municipio de Loja (2005), en donde, las estadísticas indican lo siguiente: el modo de transporte más utilizado es el bus, con un 79,55 %, mientras que, un 11,89 % se moviliza en vehículos livianos; en taxi un 6,88% y sólo 1,32 % se movilizan en vehículos pesados. Esta información es presentada en la tabla 1.

**Tabla 1.** Principales medios de movilización en Loja

<b>Definición</b>	<b>Porcentaje (%)</b>
<i>Bus</i>	79,55
<i>Vehículo liviano</i>	11,89
<i>Taxi</i>	6,88
<i>Vehículo pesado</i>	1.32
<i>Bicicleta</i>	0,35

*Nota.* Adaptado de: *Unidad Municipal de Transporte Terrestre – Loja*

Para fines de este estudio, el inventario de la carga vehicular se ha establecido bajo la siguiente clasificación:

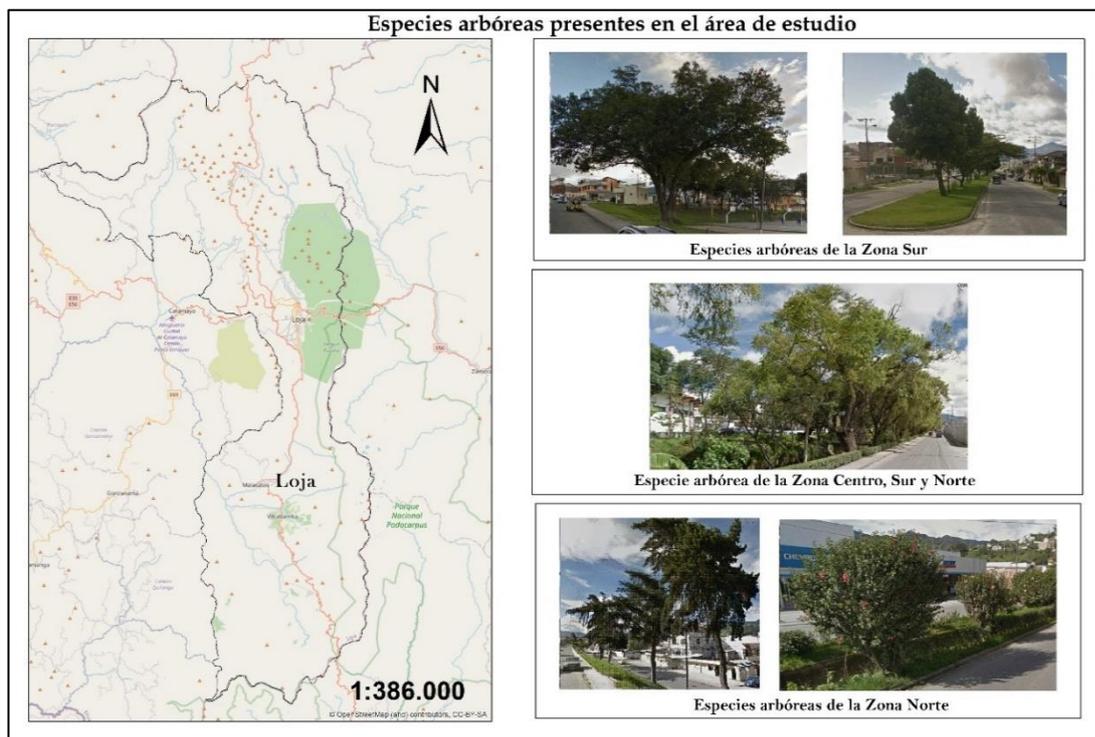
**Tabla 2.** Clasificación de los tipos de vehículos

<b>Tipo de vehículo</b>	
Pesados:	Buses, camiones, cualquier vehículo con doble eje
Livianos:	Automóviles, camionetas
<b>Motor por combustión</b>	
1. Diésel	2. Gasolina

### **Biomonitoreo**

Por otro lado, al tratarse de un biomonitoreo, es importante mencionar la relación área verde habitante, la cual es de 18,2 m<sup>2</sup>/hab, lo cual es 90 % superior a lo que, indican los valores recomendados por la OMS/OPS que está entre 10 y 14 m<sup>2</sup>/hab. Sin embargo, existen barrios urbanos centrales, los cuales poseen mayor densidad poblacional, por lo que, el área varía entre 0,5 y 1,0 m<sup>2</sup>/hab, lo cual, se encuentra muy por debajo de la norma (GAD Loja, 2014).

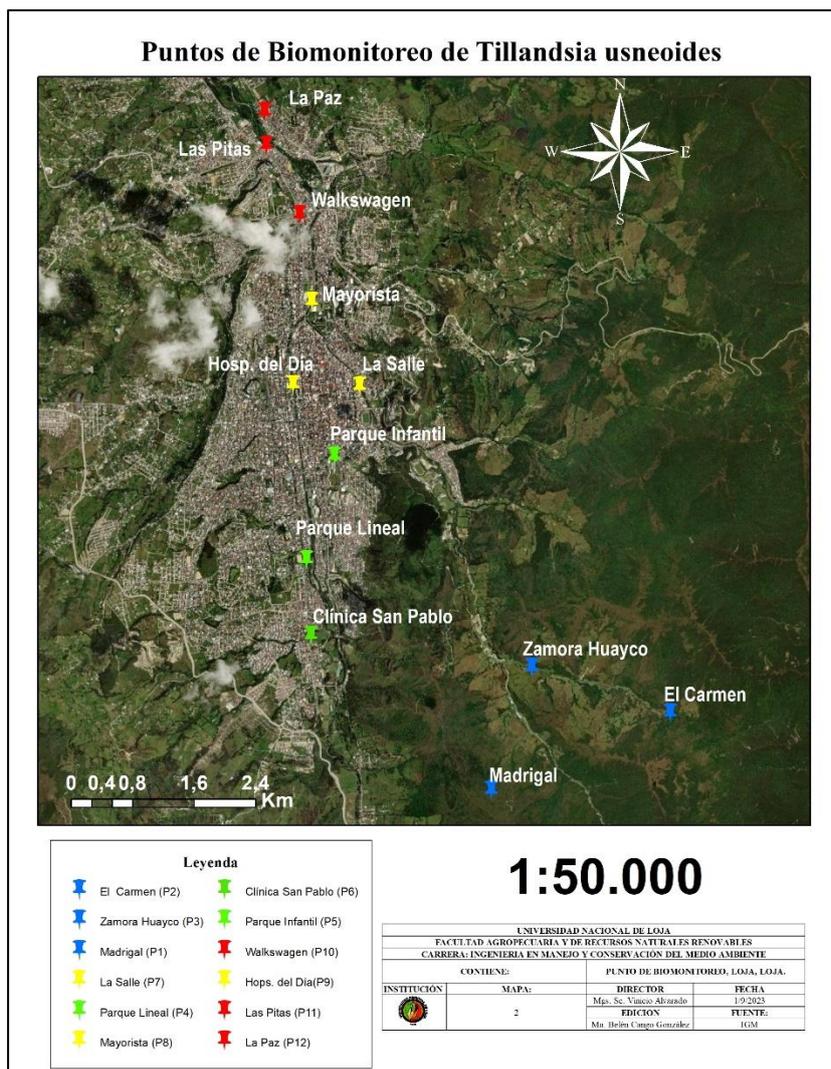
En cuanto a, la especie de *T. usneoides*, su distribución es muy notoria a lo largo de los dos principales ríos que atraviesan la ciudad (R. Malacatos y R. Zamora), esto se debe a que, la especie se alimenta de la humedad presente en la atmósfera y de los contaminantes emitidos por el tráfico vehicular y otras fuentes secundarias, por otro lado, en la ribera de los dos ríos existe presencia de cobertura vegetal en su mayoría siendo especies arbóreas como: Sauces, Guararo, Capulí, en donde se desarrolla propiamente el crecimiento de *Tillandsia*.



**Figura 3.** Especies de árboles que se encontraban en la zona de estudio

Con base a esta información, la especie de *Tillandsia usneoides* fue recolectada de árboles que, principalmente juegan el rol de hospedador, en donde, para realizar este muestreo se seleccionaron cinco individuos de árboles diferentes que estuvieran separados a más de 15 metros como distancia mínima, en línea recta.

Y de igual manera, los sitios utilizados para la cuantificación de carga vehicular, fueron los mismos que se usaron para el desarrollo de este biomuestreo. En este caso, se recolectaron 60 muestras en total, cinco muestras de 10 gramos por cada punto de monitoreo, para luego realizar una muestra compuesta del lugar (Véase en anexo 2). En este punto, también se tomó en cuenta que, las muestras fueron recolectadas de las hojas y del tallo falso de la especie, el cual, se encontraba adherido a la superficie de su hospedador. Estos puntos de muestreo se pueden evidenciar en la figura 4



**Figura 4.** Mapa de puntos correspondiente al biomonitorio

### 5.3. Determinación de la concentración de Pb, Cd y Cu a través de biomonitorio con *Tillandsia usneoides*

En cuanto al, procesamiento de las muestras, se procedió a llevarlas al laboratorio para triturarlas y obtener 0,5 g a 1 g, para evaluar el contenido de cadmio (Cd), cobre (Cu) y plomo (Pb), para ello se midieron los espectros de absorción de las cinco réplicas de cada muestra.

A cada muestra, se la pesó y se la mezcló con 10 ml de HNO<sub>3</sub> (70 %) y 2 ml de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (30 %), utilizando un sistema de microondas de alto rendimiento (Milestone SRL., Sorisole (BG), Italia), a continuación, se siguió con el método US EPA 3502 para su digestión. Después de la digestión, se ajustó el volumen de cada muestra a 100 ml utilizando agua doblemente desionizada (Véase en anexo 3).

El contenido de metales pesados en estas muestras se analizó posteriormente, usando Espectrometría de Absorción Atómica (AAAnalyst 400; Perkin Elmer). Para todo este proceso se utilizaron estándares certificados (Merk KGaA, Alemania) para cada metal a analizar, además se realizaron las curvas de calibración tomando como criterio un coeficiente de variación mayor o igual a 0,995. Véase en anexo 4.

#### **5.4. Determinación de la concentración de material particulado 2,5 en los diferentes puntos de biomonitorio.**

Se realizó un muestreo continuo con un equipo en Arduino Uno equipado con un sensor de material particulado modelo Sharp GP2Y1010AUOF. El mismo permite evaluar las tendencias de las concentraciones del material particulado en un lapso de tiempo de 24 horas, durante un mes y medio, en los meses de enero y febrero del presente año.

Para este muestreo se colocó el equipo en una ubicación intermedia de los puntos de muestreo por cada estrato, por ejemplo, de los tres sitios de muestreo que tuvimos para el estrato norte de la ciudad, se lo colocó en una zona neutral entre estos tres sitios como se mencionó anteriormente y de esta forma se lo realizó para cada estrato de la zona de estudio. Este equipo fue ubicado tres veces por semana de la siguiente manera, los lunes en el estrato sur, el miércoles en el estrato centro y los viernes en el estrato norte. Se lo realizó de esta forma, debido a que, el sensor no se encontraba disponible el resto de los días de la semana. Véase en el anexo 5.

Posteriormente para el procesamiento de los datos obtenidos con el sensor se procedió a ingresar esta base al programa Python para obtener las medidas de tendencia central y con ello poder crear los plots para observar el comportamiento que tuvo el material particulado cada 30 minutos a lo largo de todo el día que se registró la información.

##### ***5.4.1. Muestreo de polvo sedimentable***

Para este muestreo se utilizó el mismo diseño estratificado-sistemático en donde se hizo uso de colectores pasivos. Colocando seis colectores en cada estrato, dividiendo dos colectores por cada lugar de estudio, dando un total de 24 colectores pasivos. Este muestreo tuvo una duración de dos meses y medio, haciendo cambio de filtros cada 18 días para poder obtener una muestra representativa del polvo que se generaba en cada sitio. Véase en el anexo 6.

Una vez retirados los filtros, se procedió a trasladarlos al laboratorio ambiental para realizar su respectivo análisis por gravimetría, de esta forma, se pudo conocer la concentración de polvo que lograron retener. Véase en el anexo 7.

Luego de determinar la concentración de polvo sedimentable (PS), se propuso determinar la cantidad de metales trazas que se encontraban contenidos en el PS, para ello se hizo una digestión de las muestras en el laboratorio de química analítica. Con el uso del equipo de Espectrometría de Absorción Atómica, donde se pudieron determinar algunos metales que se encontraban presentes, esta práctica se llevó a cabo haciendo uso de los estándares certificados para cada metal. Véase anexo 8.

### **5.5. Análisis la incidencia del tráfico vehicular en la calidad del aire de la ciudad de Loja.**

Para este análisis se procedió a la compilación y procesamiento de los datos obtenidos en campo y tras haber realizado los respectivos análisis de laboratorio, se redactó el informe final.

### **5.6. Análisis estadístico**

Se aplicaron análisis estadísticos para el objetivo dos y tres, haciendo uso de estadística descriptiva e inferencial según, se estableció para cada objetivo. La finalidad de la aplicabilidad de estos análisis fue el poder conocer el grado de asociación que tiene el tráfico vehicular en la calidad del aire de la ciudad, midiendo el grado de absorción de metales pesados que tuvo la especie. Adicional a los muestreos antes realizados, se añadió un monitoreo de polvo sedimentable en el cual también se pudo correlacionar el tráfico vehicular con la cantidad de metales pesados que se encontraban presentes a forma de trazas en el polvo sedimentable. A continuación, se presenta el análisis para cada objetivo.

#### ***5.6.1. Análisis de los datos correspondiente al biomonitoreo***

Para conocer el grado de asociación entre variables, en primer lugar, se realizó un test de normalidad de Shapiro-Wilk (valor de  $p > 0,05$ ) para verificar si la concentración de los metales y la variable de tráfico vehicular (carga vehicular) tenían una distribución normal. Posterior a ello, se aplicó una prueba no paramétrica de correlación de Spearman para poder conocer la correlación que existía entre las mismas.

Esta prueba no paramétrica tiene un grado de asociación que va desde +1 a -1. Se utiliza para variables cuantitativas de libre distribución o con datos ordinales. Un resultado de 0 significa que no hay correlación, es decir, el comportamiento de una variable no se relaciona con el comportamiento de la otra variable; una correlación perfecta implica un valor de -1 o +1, lo cual indicaría que al conocer el valor de una variable sería posible determinarse el valor

de la otra variable. Mientras que, entre más cercano a 1 sea el coeficiente de correlación, mayor la fuerza de asociación (Roy-García et al., 2019).

### ***5.6.2. Análisis de los datos correspondiente al monitoreo de Material Particulado 2,5.***

Para el procesamiento de estos datos se utilizó el software RStudio y el software Python en línea, empleando estadística descriptiva para la interpretación de los datos y el diseño de las gráficas mediante el uso de diagramas de cajas y bigotes para poder conocer la distribución de la carga vehicular y gráficas del comportamiento del material particulado para cada día de estudio. Adicional a esto, se realizó un mapa para los datos meteorológicos que se registraron durante los meses de muestreo.

### ***5.6.3. Análisis de datos correspondientes a polvo sedimentable***

Para el análisis de estos datos se hizo uso de estadística inferencial, en donde se realizó un test de normalidad de Shapiro-Wilk (valor de  $p > 0,05$ ) para verificar si la concentración de los metales encontrados en el polvo sedimentable y la variable de tráfico vehicular (carga vehicular) tenían una distribución normal. Finalmente, se aplicó una prueba no paramétrica de correlación de Spearman para poder conocer la correlación que existía entre las mismas.

## 6. Resultados

Los resultados de esta investigación han sido divididos por cada objetivo de estudio, la información presentada a continuación es la compilación de todo el trabajo de campo y de los análisis estadísticos que se realizaron previamente, sumado a esto se incluyó también información referencial para la interpretación de los datos.

### 6.1. Cuantificación de la carga vehicular y biomonitoreo de *T. usneoides*

La línea base del proyecto permitió obtener información general de la ciudad de Loja donde se realizó el estudio, con esta información se pudo proceder a seleccionar las zonas de mayor vulnerabilidad a la contaminación como lo son los hospitales, escuelas, y sitios bastante concurridos por los peatones; además, teniendo la información base, se pudo observar lugares en donde la calidad del aire es más limpia debido a la presencia de cobertura vegetal, por lo cual se pudo definir los sitios de control para el biomonitoreo y para el monitoreo del tráfico vehicular.

Los sitios de estudio se describen a continuación:

**Tabla 3.** Estratos de estudio para el biomonitoreo

Zona de Estudio	Descripción de la zona
<i>Zona De Control (P)</i>	En el área de control existe abundante cobertura vegetal y escasa influencia antrópica, lo que significa que existe un aire menos contaminado teniendo una atmósfera relativamente más limpia.
<i>Zona Sur (S)</i>	Este distrito se caracteriza por extensas áreas verdes y parques recreativos (1.053.000 m <sup>2</sup> ), también cuenta con una baja cantidad de áreas verdes por habitante (15,38 m <sup>2</sup> /hab), sin embargo, está sujeto a un tráfico relativamente alto debido a que las personas requieren movilizarse a la zona céntrica donde se encuentra la mayor actividad en la ciudad.
<i>Zona Centro (C)</i>	El distrito centro es un área mayoritariamente urbana, con poca cantidad de área verde por habitante (11,58 m <sup>2</sup> /hab) y muy poca vegetación (las áreas verdes cubren solo 635,000 m <sup>2</sup> ); y está sujeto a grandes volúmenes de tráfico.

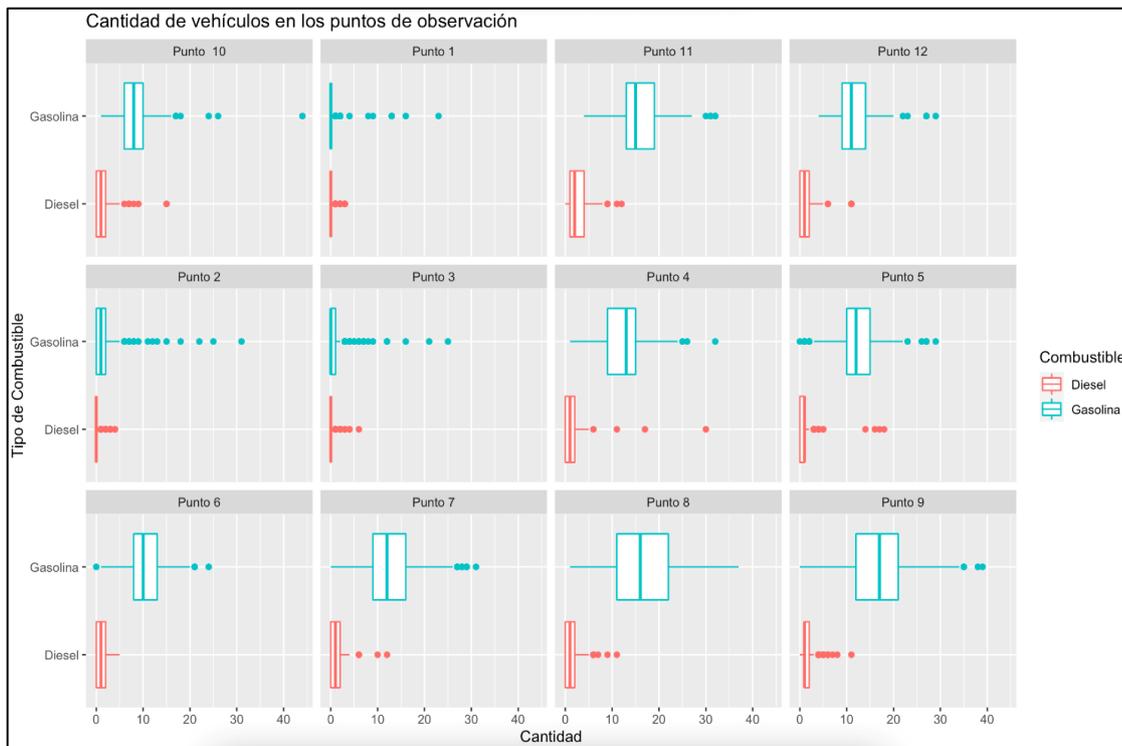
Se encuentran la mayor parte de centros educativos, de salud, comercios, etc.

Cuenta con una cantidad relativamente grande de espacios verdes (1.060.000 m<sup>2</sup>), este distrito de la ciudad tiene una gran cantidad de espacios verdes por habitante (38,95 m<sup>2</sup>/ hab); está sujeto a tráfico moderado únicamente.

### Zona Norte (N)

En cuanto a la carga vehicular en la ciudad de Loja se registraron los siguientes datos, clasificándolos por tipo de combustible (diésel y gasolina) y por el tipo de vehículo (livianos y pesados). Véase el anexo 9.

La información se puede observar en la figura 5 y 6.



**Figura 5.** Cantidad de vehículos por tipo de combustible

Como podemos observar en el diagrama de caja y bigote, existe mayor presencia de vehículos a gasolina que a diésel. En los puntos de "La Salle", "Hosp. Del día" y "Mayorista" (7, 8 y 9 respectivamente) que corresponden al estrato centro, podemos observar que, la mediana de los datos se ubica entre los 15 vehículos, presentando una distribución asimétrica positiva, esto quiere decir que el resto de datos muestreados se ubican por encima de los 15

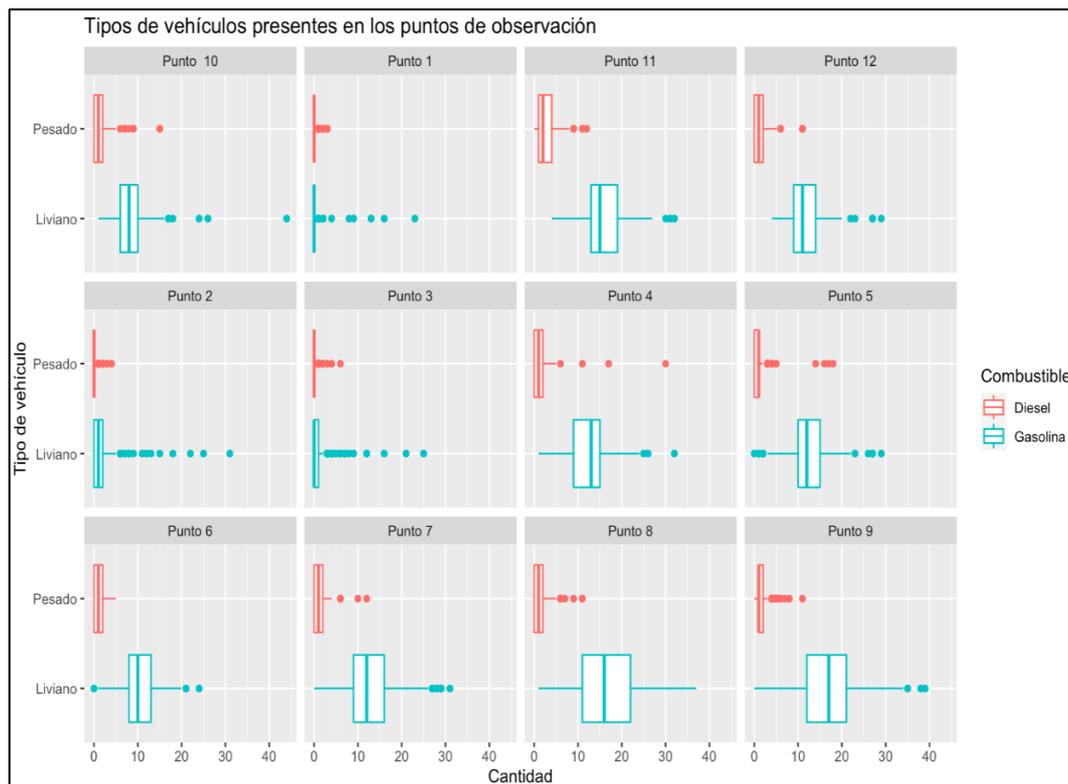
vehículos alcanzando registros de hasta 35 vehículos a gasolina, esto es importante porque significa que la especie de *T. usneoides* está expuesta a grandes cantidades de compuestos contaminantes provenientes del tráfico vehicular, a su vez estos datos nos indican que, al existir grandes contaminantes en esta zona, se pone en riesgo la salud de las personas que concurren por estos sitios.

En el caso de la zona de control que corresponde al punto 1, 2 y 3, podemos observar que no existe gran afluencia de vehículos por lo que se presume que aquí la calidad del aire será más limpia que el resto de puntos de muestreo.

En lo que corresponde al estrato sur que son los puntos 4, 5 y 6, se puede notar que la mediana de los datos rodea 13 vehículos y que asimismo se presenta una distribución asimétrica positiva, es decir que la mayor parte de los datos recolectados se encuentran sobre la mediana de los 13 vehículos, teniendo en este caso entre 2 a 5 datos mínimos y de 20 a 25 datos como máximo registrados que corresponde al tipo de combustible a gasolina durante los dos meses y medio de muestreo.

Para la zona o estrato norte que concierne a los puntos 10, 11 y 12, podemos evidenciar que existe mayor afluencia de vehículos a diésel, esto se debe a que es una zona de alto tráfico comercial, por lo que circulan vehículos de doble eje como buses, volquetas, camiones, plataformas, entre otros. Si bien en comparación a los carros a gasolina donde se presenta mayor cantidad, es importante destacar que, de todos los puntos de muestreo, esta zona es la que presenta una mediana de alrededor de 4 a 6 vehículos, teniendo la mayor cantidad registrada de 10 vehículos esto siendo en el punto 11, durante todo el muestreo.

En cuanto al muestreo por tipo de vehículos, si correspondían a livianos o pesados tenemos la siguiente información:



**Figura 6.** Cantidad de vehículos por tipo

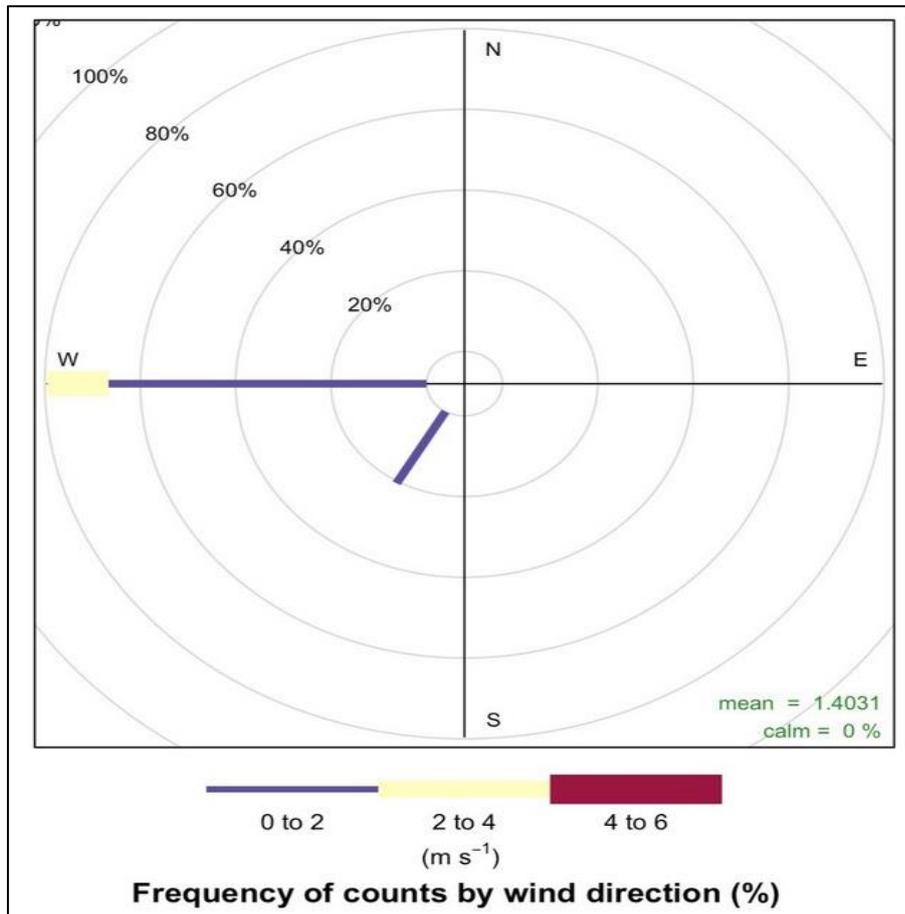
En la figura 6 se puede evidenciar que la mayor cantidad de carros son de tipo liviano, de manera general, podemos observar que, en los 12 puntos de muestreo la distribución se presenta de esa manera. Además, existen algunos datos anómalos en la gráfica lo que significa que, en ese sector entre algún día de muestreo se presentó algún evento que hizo que se registrarán más datos fuera del rango máximo registrado para cada punto.

Como podemos notar en la gráfica, el punto 8 correspondiente al "Mayorista", es el que, presenta mayor cantidad de datos recolectados, teniendo una distribución casi simétrica en su totalidad, sin embargo, existe una asimetría positiva, en donde la mayor cantidad de vehículos de tipo liviano que se registraron fue de 37 unidades, y siendo su mediana 13 carros por minuto.

En cuanto a la zona de control la cantidad de vehículos pesados y livianos es casi similar, presenciando baja cantidad de afluencia vehicular para estos puntos durante los meses de muestreo.

Durante estos meses de muestreo también se registraron datos meteorológicos en donde se obtuvieron datos de temperatura, dirección del viento y precipitación. Dicho esto, para conocer cómo se comportaron los vientos durante los meses de noviembre, diciembre y

mediados de enero a continuación se presenta la Rosa de los Vientos correspondiente a los datos meteorológicos de la ciudad de Loja en el tiempo de estudio. Véase en la figura 7.



**Figura 7.** Rosa de los vientos

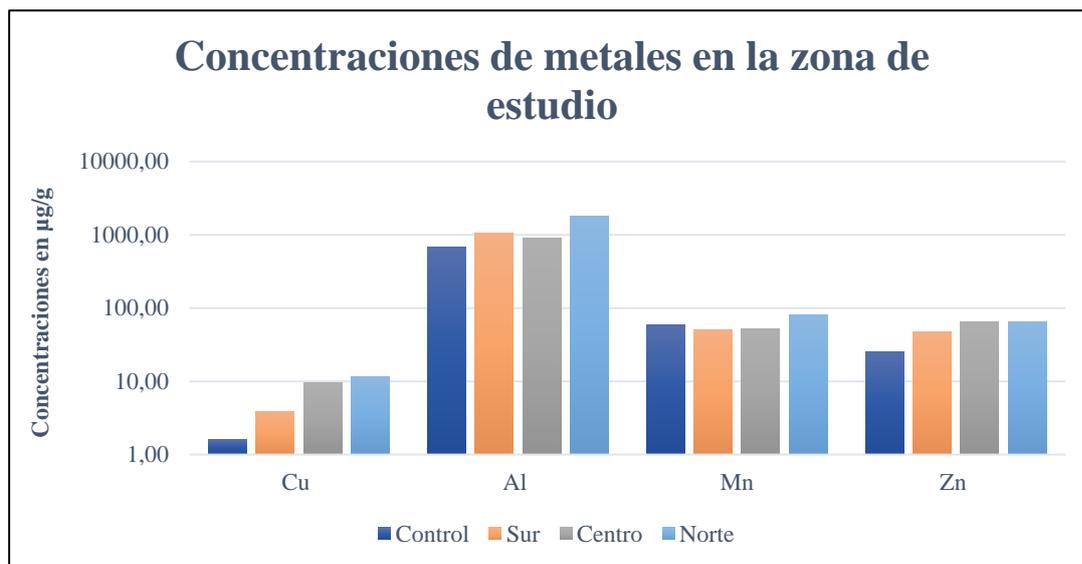
La rosa de los vientos presentada muestra que, el 70% de los vientos tienen una dirección W (oeste) con una velocidad de 0 a 2 m/s, lo que según, la escala de Beaufort nos indica que, tienden a ser bastante calmados, también se puede observar que, un 10% de los vientos presentan una dirección W, pero, con velocidades entre a 2 a 4 m/s, lo que, corresponde a ventolinillas, en donde, el humo nos puede indicar la dirección del viento. Finalmente, podemos observar un 20% de los vientos registrados que van en dirección SW tienen velocidades de 0 a 2 m/s, como ya se mencionó anteriormente, corresponden a vientos calmados.

## **6.2. Determinación de la concentración de Pb, Cd y Cu a través de biomonitorio con *Tillandsia usneoides*.**

Como resultado del biomonitorio realizado se pudieron analizar algunos metales que se encontraba absorbidos por la especie, obteniendo la siguiente información.

Se determinó que no existieron concentraciones de plomo y cadmio como se esperaba inicialmente (*véase en el anexo 10*), esto debido a que, las muestras se recolectaron de las hojas de la especie, en donde la concentración es menor, en comparación con la parte del tallo falso, donde se acumulan por más tiempo los contaminantes suspendidos. Sin embargo, se pudo identificar la presencia de cobre en la especie. No obstante, se realizaron análisis químicos adicionales en donde, se pudo determinar la presencia de manganeso, hierro, zinc y aluminio.

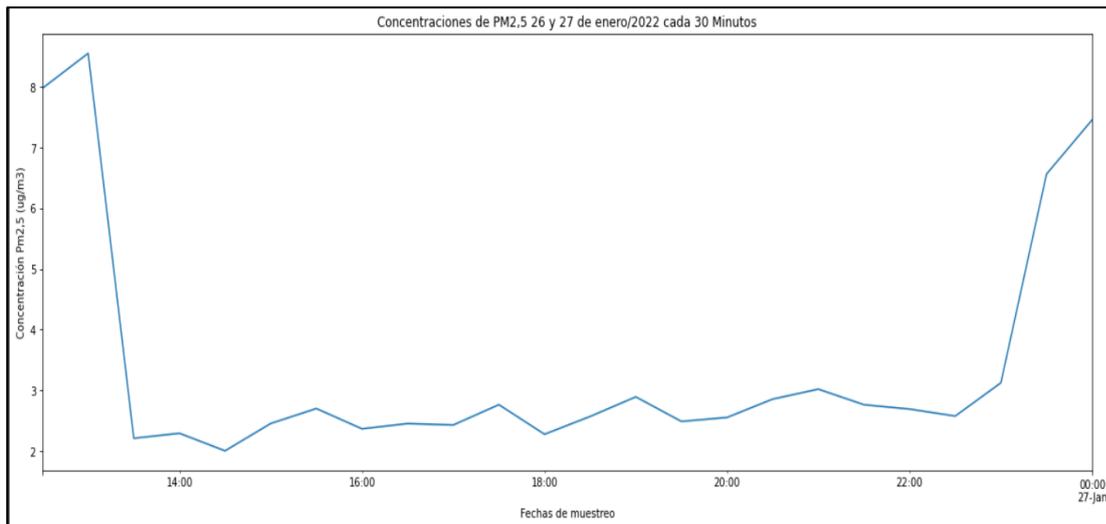
A continuación, se presenta en la figura 8, en donde se muestran las concentraciones por cada estrato de estudio.



**Figura 8.** Registro de las concentraciones de metales en µg/g, obtenidos del análisis químico

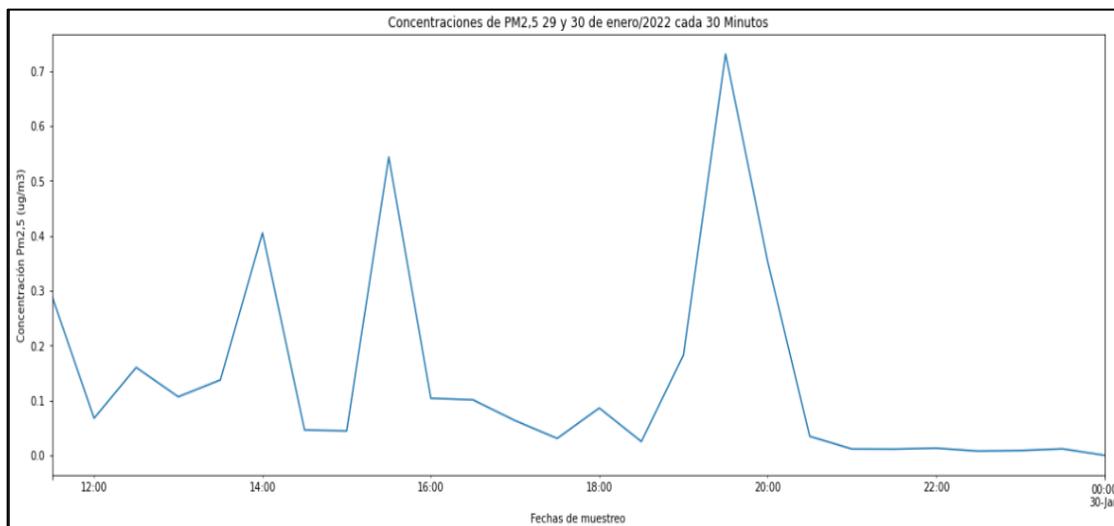
### 6.3. Determinación de la concentración de material particulado 2,5 en los diferentes puntos de biomonitorio

En lo concerniente al análisis de material particulado 2,5 durante el periodo de muestreo se registraron las siguientes tendencias durante finales del mes de enero y el mes de febrero.



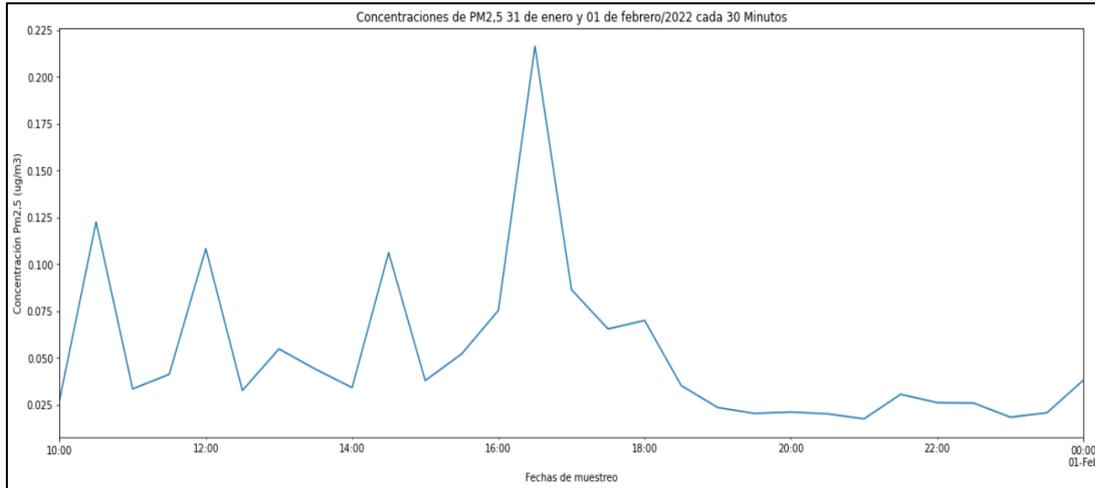
**Figura 9.** Concentraciones de PM 2,5 para el 26 y 27 de enero 2022 cada 30 minutos

Como se puede observar las concentraciones de material particulado no excedieron lo establecido en la legislación ambiental que son  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  d, sin embargo, se presentó un registro de  $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , pero no es de gran relevancia puesto que como ya se mencionó anteriormente no sobrepasa los LMP. Estos datos son procedentes del estrato sur.



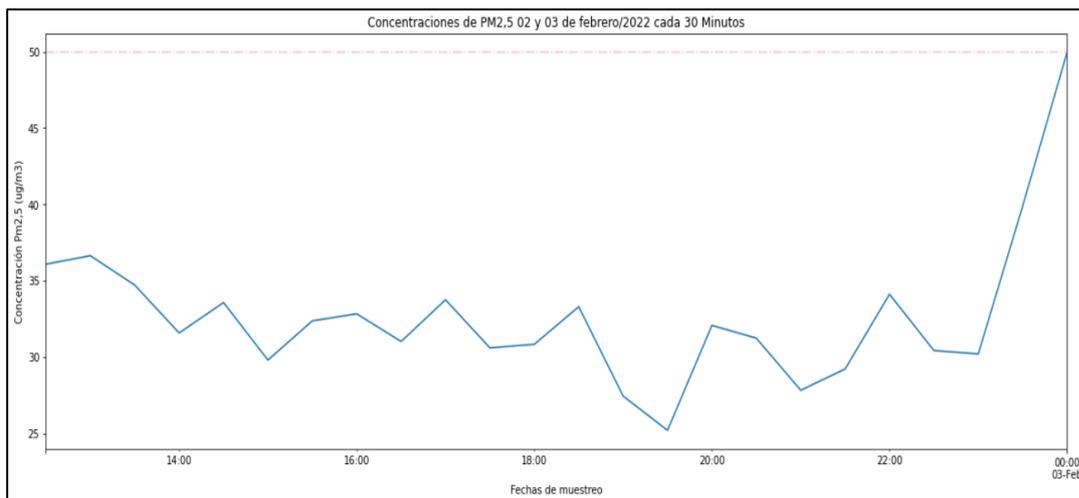
**Figura 10.** Concentraciones de PM 2,5 para el 29 y 30 de enero del 2022 cada 30 minutos

Podemos observar la tendencia de MP que no presenta grandes concentraciones para el día que fue colocado el sensor. Esta gráfica corresponde al sector centro donde tampoco sobrepasa los LMP.



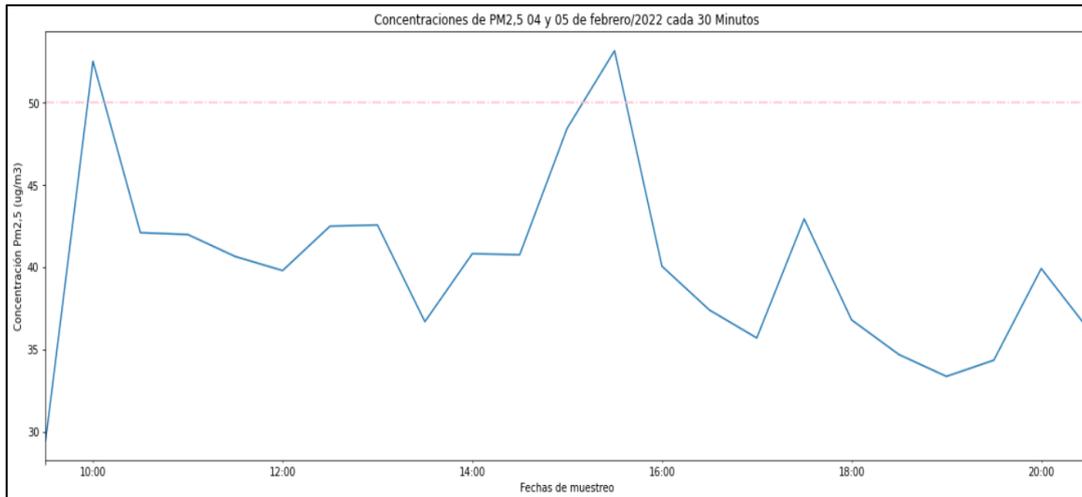
**Figura 121.** Concentraciones de PM 2,5 para el 31 de enero y 01 de febrero del 2022 cada 30 minutos

Podemos observar la tendencia de MP que no presenta grandes concentraciones para el día que fue colocado el sensor. Esta gráfica corresponde al sector norte donde tampoco sobrepasa los LMP



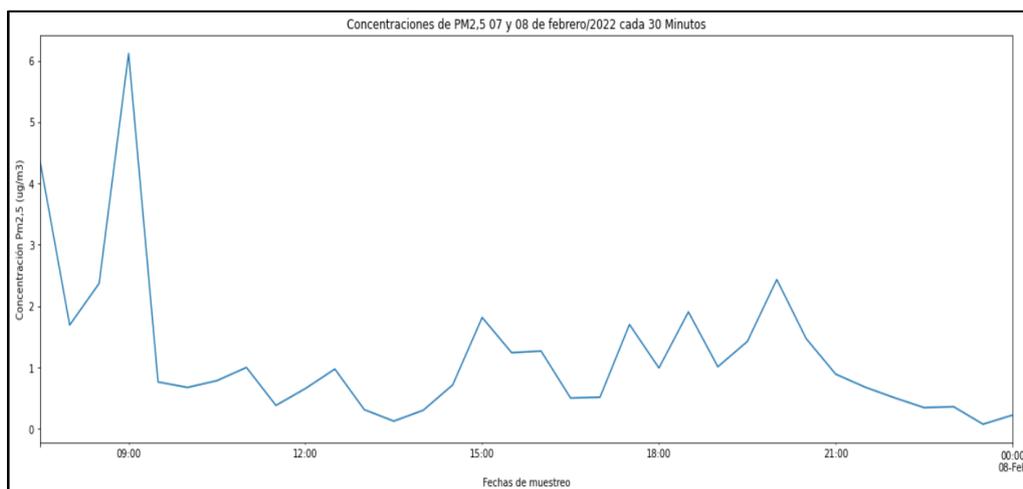
**Figura 112.** Concentraciones de PM 2,5 para el 02 y 03 de febrero 2022 cada 30 minutos

Para este día la tendencia de materia particulado empieza a elevarse notablemente, esto es debido a que en la ciudad de Loja se presentó un fenómeno de Inversión Térmica, en donde existió gran cantidad de material particulado que se encontraba suspendido en el aire, en este día como podemos observar en la gráfica se dispara el pico de concentraciones alrededor de las 00h00 pm del día 03 de febrero. Estos datos fueron registrados del estrato sur.



**Figura 143.** Concentraciones de PM 2,5 para el 04 y 05 de febrero 2022 cada 30 minutos

Para el día 04 y 05 de febrero podemos evidenciar la presencia de este fenómeno de estabilidad atmosférica. Durante los cinco días que duró este fenómeno, no se registraron presencia de precipitaciones, lo que no permitió a la atmósfera diluir los contaminantes o en su defecto depositarlos, como podemos observar estos días se registraron altas concentraciones de material particulado sobrepasando los estándares de calidad establecidos por la OMS para un día, esto significaba que existió un alto riesgo de contraer infecciones a las vías respiratorias, por lo que se recomendó quedarse en casa y utilizar mascarilla doble en caso de salir al aire libre. Estos datos fueron registrados del estrato centro.



**Figura 134.** Concentraciones de PM 2,5 para el 07 y 08 de febrero 2022 cada 30 minutos

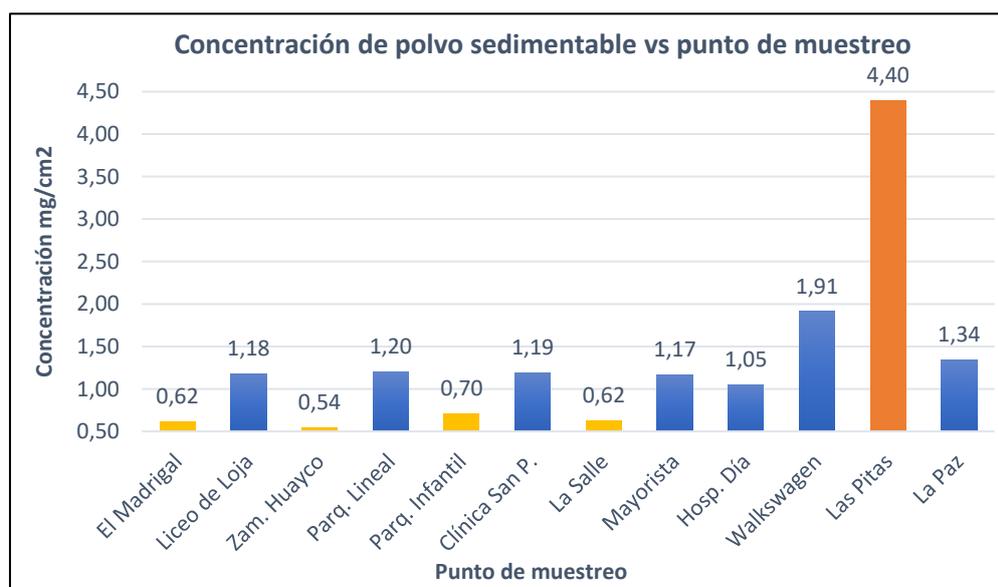
Como se puede observar en la figura 14 existe una decadencia de las concentraciones de material particulado esto debido a la presencia de precipitaciones para estas fechas, por lo que se pudieron diluir los contaminantes que se encontraba suspendidos en el aire. Se puede

notar que la tendencia del material particulado ya no sobre pasa los  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , aunque existieron pequeños picos de concentraciones entre  $6$  a  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , no obstante, esto ya no presentaba riesgo para la salud de las personas puesto que ya la calidad del aire se encontraba en un estado bueno. Estos datos fueron registrados del estrato norte.

Con el transcurrir de los siguientes días las tendencias que registró el sensor fueron bajas y no sobrepasaron los LMP (Véase en el anexo 11), por lo que se puede inferir que realmente no existe presencia de material particulado que pueda poner en riesgo la salud de los habitantes, sin embargo, al trabajar con biomonitoreo y al tener una especie sensible a los cambios, se pudo observar que *Tillandsia usneoides* sí cambió su composición morfológica al estar expuesta a las altas concentraciones durante el periodo de muestreo.

- **Polvo sedimentable**

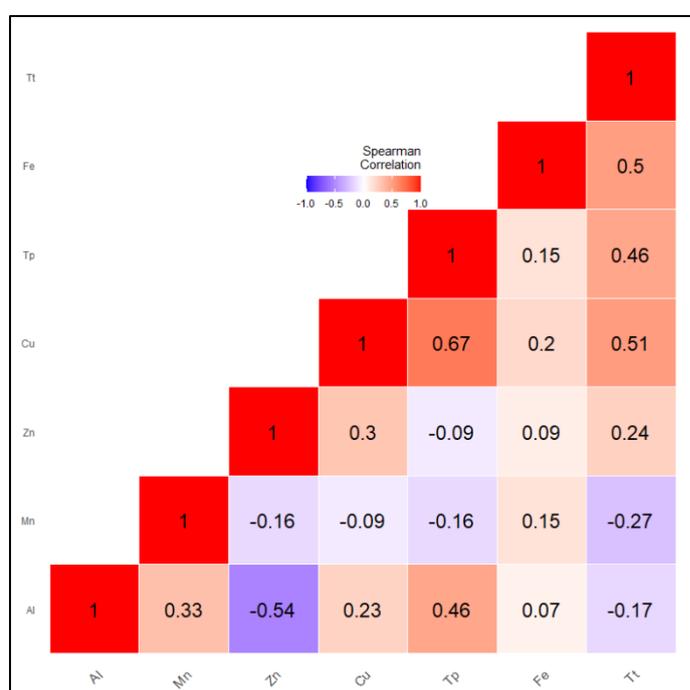
Luego de realizar el análisis gravimétrico para conocer si este contaminante está sobrepasando los límites máximos permisibles, se obtuvo la siguiente información presentada en la figura 15



**Figura 15.** Concentraciones de polvo sedimentable durante dos meses y medio de muestreo

Se observa que, las concentraciones de polvo sedimentable que se analizaron en este estudio se encuentran sobrepasando el Límite Máximo Permitido por la OMS que es  $1 \text{ mg}/\text{cm}^2$  durante 30 días en las localidades de: “Liceo de Loja, Parq. Lineal, Clínica San Pablo, Mayorista, Hosp. del Día, Walkswagen, Las Pitas y La Paz”; siendo la máxima concentración generada de  $4,40 \text{ mg}/\text{cm}^2$  que corresponde al sector de “Las Pitas”, la cual es la más elevada en comparación con el resto de las localidades.

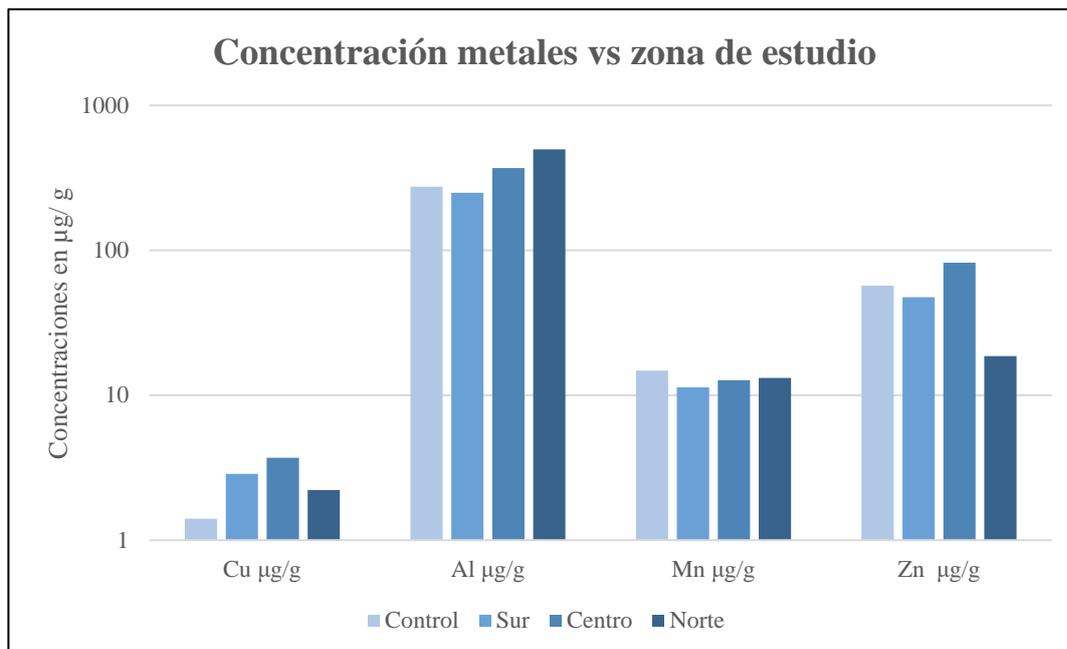
Adicional a este análisis, se procedió a realizar el análisis químico de los filtros para obtener los metales trazas que se encontraban presentes, en donde, se obtuvieron las concentraciones de Fe, Cu, Mn, Zn y Al (“en este contexto los metales traza presentes en el polvo sedimentable generalmente en pequeñas cantidades, juegan un rol muy importante en los problemas de salud humana debido a que son altamente biorreactivos” (Herrera y Rodríguez, 2011) ). Una vez obtenidas las concentraciones se procedió a realizar una correlación de Spearman para relacionarlo con la variable del tráfico vehicular, en donde, se utilizó el promedio diario y el total de vehículos que se contabilizaron durante el muestreo. La información se presenta en la siguiente figura 16.



**Figura 16.** Correlación de Spearman. Tráfico vehicular vs metales traza presentes en el polvo sedimentable

Como se observa en la figura 16, el Mn tuvo una correlación negativa frente al tráfico total, mientras que, el Zn, Cu y Fe presentaron una correlación positiva. Por otro lado, el Cu ha sido el metal con mayor presencia en el polvo sedimentable como se muestra en el gráfico. También, se puede observar la relación significativa que tiene el Aluminio con cerca de 0.5 frente al tráfico promedio diario.

En cuanto a las concentraciones de los metales por cada zona de estudio se obtuvo la siguiente figura.

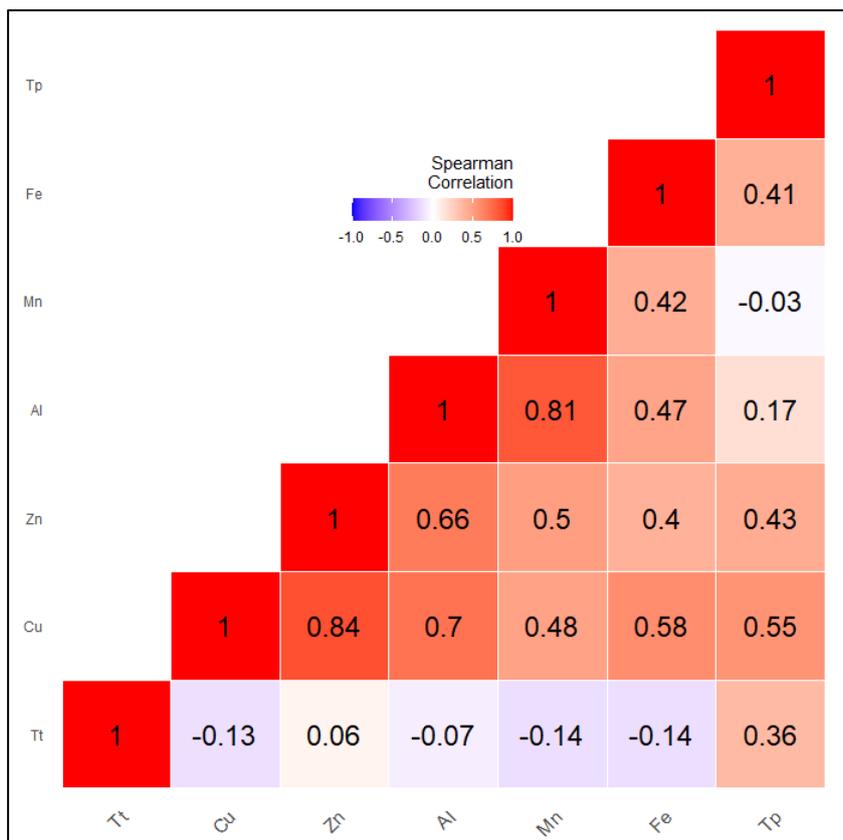


**Figura 17.** Concentración de metales traza presentes en el polvo sedimentable, detallado a cada zona de estudio

Se pudo determinar que, el Aluminio es el compuesto que más presencia tuvo en el polvo sedimentable, seguido del Zn el cual, presenta valores aproximados a 100 µg/g. Por otro lado, en la zona céntrica es en donde existe una ligera superioridad de contaminantes que se encuentran suspendidos en el aire, esto debido que, a existe mayor afluencia de tráfico vehicular en comparación con el resto de zonas.

#### **6.4. Análisis de la incidencia del tráfico vehicular en la calidad del aire de la ciudad de Loja**

Se determinó la relación que tiene el tráfico vehicular con la calidad del aire de la ciudad, y para ello se realizó una prueba de correlación entre los metales pesados (Al, Cu, Mn, Zn y Fe) y la carga vehicular, en esta última variable, se tomó en cuenta el tráfico total y el tráfico promedio diario, obteniendo el siguiente resultado.



**Figura 18.** Correlación de Spearman entre los metales encontrados en *T. usneoides* vs tráfico vehicular

Como se puede observar en la figura 18, los metales Cu, Al, Mn y Fe presentan una correlación negativa frente al tráfico total, mientras que, con Zn no existe una correlación, esto quiere decir que no existe un grado de asociación entre las variables. Por otro lado, al analizar la correlación entre el tráfico promedio diario y los metales estudiados se pudo observar que, el grado de asociación entre variables fue positivo y significativo a excepción del manganeso. Otro aspecto interesante que se pudo observar en la gráfica es que, todos los metales estuvieron correlacionados entre sí, sin embargo, la concentración en la que se encuentran cada uno varía dependiendo del grado de biodisponibilidad que tiene para la especie (Kabata-Pendias, 2000).

## 7. Discusión

En la presente investigación en lo que respecta al biomonitoreo con *Tillandsia usneoides*, es importante destacar que la morfología de la especie presenta raíces aéreas muy delgadas que desaparecen al iniciar su desarrollo, siendo un aspecto clave puesto que, el plomo y el cadmio en las plantas se deposita principalmente en las raíces antes que, en otro órgano, lo que dificulta su crecimiento (Ramírez et al., 2009). Al tomar las muestras de las hojas y las ramificaciones finales, pudo ser un punto importante para que no haya existido de forma representativa altas concentraciones de Pb y Cd en el análisis químico, similar a lo presentado por (Mulgrew et al, 2000) donde los efectos en el crecimiento de *Tillandsia* fueron detectados como respuesta a la contaminación del aire. Por el contrario, Beltrán et al. (2012), en su investigación con *T. usneoides* mencionan que, esta especie puede reflejar gran medida del Pb presente en el aire, aunque a nivel macro la planta no presenta daños visibles, la correlación entre los parámetros biológicos que estudiaron indicaron un estrés metálico, además, los resultados presentados en su estudio indican que se realizó un biomonitoreo activo durante tres meses, en comparación con nuestro estudio, el cual se realizó durante un día obteniendo cinco muestras representativas por cada sitio de muestreo.

Asimismo, Loaiza y Luzuriaga (2016), realizaron un estudio de metales pesados analizando cadmio, zinc y plomo en la ciudad de Loja, en donde indican altas concentraciones de estos metales en la especie, también mencionan que, el mayor foco de contaminación se encuentra en el casco céntrico de la ciudad; en esta investigación, se pudo evidenciar que coincide con su caso de estudio en cuanto a la determinación de zonas más contaminadas, y que además, las zonas de control presentaron menor nivel de contaminación como se esperaba inicialmente. En esta investigación se pudo demostrar que las concentraciones de metales van disminuyendo dependiendo de la zona de estudio, tal como ocurre en el estudio realizado por (Benítez et al., 2019), en donde también mencionan que, la interacción entre zona y especie sólo fue significativa para el Cd y el Zn, en nuestro estudio la concentración de Zn, Al y Cu en la especie fueron las más representativas frente al Pb y al Cd, los cuales como ya se mencionó no se expresaron en el análisis químico.

Un estudio similar realizado por Ramírez et al. (2008), expone que, todos los metales son componentes importantes del metabolismo y la fisiología de las plantas, y las fluctuaciones en las concentraciones de metales pesados en el biomonitoreo parecen estar relacionadas con

las necesidades de la especie bajo ciertas condiciones ambientales, como el viento y la precipitación y la disponibilidad de luz solar, sin embargo, Figueiredo et al. (2007) indican que, la acumulación de los metales en las *Tillandsia usneoides* pueden reflejar el grado relativo de la carga de contaminantes en el aire, y que también, esta acumulación va a incidir en la dispersión de la especie. Mientras que, en nuestro estudio se pudo observar que no existe gran acumulación de metales más allá de las concentraciones significativas de aluminio.

En cuanto al análisis correspondiente al monitoreo de material particulado se pudo precisar que, la ciudad de Loja, se mantiene por debajo del límite máximo permisible establecido en la normativa ambiental que son  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  día. Es importante destacar que, en Loja existen vientos de más de 2 m/s lo que permite la dilución de los contaminantes, además, es una zona que registra precipitaciones constantes, por lo que, esto da paso al mantenimiento de una atmosfera limpia. No obstante, cuando se pudo observar el fenómeno de inversión térmica, se obtuvieron registros de la “estación de monitoreo 1” de la Universidad del Azuay, en donde el comportamiento del material particulado que se pudo evidenciar a horas de la noche del 2 de febrero comenzó a elevarse, registrándose para el día 3 de febrero concentraciones de más de  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Esto en comparación con nuestros datos, indicaron que, el índice de calidad ambiental sobrepasaba las 146 unidades para la ciudad de Cuenca (Universidad del Azuay, 2022), mientras que, en nuestra ciudad se calculó un ICA de 57 unidades, lo que significa que, las personas extraordinariamente sensitivas limitaron su exposición por tiempos prolongados al aire libre. Posteriormente, los días correspondientes al 04 y 05 de febrero se registraron 148 unidades en el ICA, lo que provocó afecciones en las personas que pertenecen al grupo de vulnerabilidad (niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias).

Fuera de la presencia de este fenómeno fortuito, existen estudios como el de Giuliani (2020), el cual señala que la presencia de material particulado en las zonas va a disminuir dependiendo de la dirección de los vientos, y que, los contaminantes pueden ser transportados de un lugar a otro, marcando tendencias bajas de éste compuesto en la ciudad de La Plata. Así mismo, Gálvez et al. (2020) en su estudio realizado en la ciudad de Manizales, identificaron que, las concentraciones también se ven influenciadas por el día de la semana, donde los fines de semana (sábado y domingo) el tráfico vehicular disminuye tanto en vehículos particulares como en el servicio de transporte público, por ende, las concentraciones disminuyeron estos días. Mientras que, en nuestro trabajo se pudo observar que las tendencias de concentraciones para el material particulado se mantuvieron constantes durante todo el monitoreo, coincidiendo

en que, se registraron mayor cantidad de vehículos entre semana, a diferencia de los días sábados como en el estudio antes mencionado.

Otro estudio realizado por Urrutia Llerena (2021) en la ciudad de Riobamba nos indica que, en las zonas céntricas las concentraciones de material particulado 2,5 van a incrementarse debido a la alta concurrencia vehicular, sumado a la presencia de comercios y restaurantes que actúan como fuentes fijas de compuestos contaminantes como metales pesados, COvs, PM, entre otros. En este estudio la mayor cantidad de vehículos que se registraron fueron también pertenecientes al estrato céntrico.

Se puede decir que, si bien los vehículos emiten grandes cantidades de gases y compuestos contaminantes, aún en nuestra ciudad se encuentran por debajo de lo establecido en la normativa, esto podría deberse, a que, al momento de la matriculación, los vehículos pasan por un proceso de revisión técnica en donde se verifica que no emitan más cantidad de compuestos tóxicos al ambiente de lo que es permitido, ya que, en caso de incumplir con este requisito, no se renueva la matrícula vehicular.

En lo que respecta al análisis de polvo sedimentable, Merma et al. (2021) menciona en su estudio que, el flujo vehicular influye en la suspensión de material particulado PM 10 y polvo sedimentable en la zona cercado de la ciudad de Ilave, en nuestros hallazgos se pudo evidenciar que las concentraciones difieren dependiendo de la zona, siendo el estrato norte el que presentó mayor concentración de polvo sedimentable. En nuestro estudio se analizaron los metales traza presentes en el polvo sedimentable que provenía del tráfico vehicular, en donde se pudo evidenciar que el Cu, Al y Fe se encuentran formando parte mayoritaria del contaminante principal (polvo sedimentable), Machado et al. (2008) en un estudio similar en Zulia-Venezuela mencionan que al analizar las concentraciones de Pb, Zn, Ni y Cr, la relación iba disminuyendo, no obstante, en zonas donde existía mayor tráfico vehicular se registraron mayores concentraciones de Zinc y Plomo, mientras que en nuestros hallazgos, las concentraciones de Zn y Pb que fueron analizados registraron una correlación negativa frente al tráfico promedio diario y al tráfico total.

De manera general, se analizaron estos metales ya que son los principales compuestos provenientes de varias partes de los automóviles. El Cu, Zn y el Mn provienen de las pastillas para frenos y las partículas desprendidas por el desgaste de las llantas (Drapper et al., 2000).

Otro estudio realizado en la ciudad de Baja California por Cortés et al. (2017), señala que el asfalto contiene las mayores concentraciones de Cr, Ni, Pb y Zn, Esto se debe a que las

vialidades primarias regularmente son asfaltadas y contienen la mayor afluencia vehicular, pudiendo ser la causa principal de las altas concentraciones, como sucede en nuestra zona de estudio, en donde las vías del estrato norte, sur y centro son asfaltadas, y a excepción de las vías que conducen al estrato de control que son de tercer orden, en donde no registró afluencia significativa de tráfico vehicular y tampoco se pudo evidenciar grandes concentraciones de polvo sedimentable.

Finalmente, otra investigación realizada en el área metropolitana en Nigeria, indica que las principales fuentes de metales pesados presentes en el polvo sedimentable (Cu, Ni, Mn Cd) en la zona muestreada podrían atribuirse a actividades antropogénicas como la incineración abierta de residuos y el tráfico vehicular (Mafuyai et al., 2014), en nuestra ciudad las actividades antropogénicas son pocas ya que Loja no es una ciudad industrializada, sin embargo, se concuerda con el estudio antes mencionado, puesto que las concentraciones de polvo sedimentable excedieron los LMP, esta contaminación se le atribuye al tráfico vehicular como principal fuente de contaminación en la ciudad.

## 8. Conclusiones

Esta investigación permitió conocer cómo se encuentra la calidad del aire en la ciudad de Loja bajo la influencia que tiene el tráfico vehicular como principal emisor de compuestos contaminantes llegando a las siguientes conclusiones.

- La línea base permitió establecer diferencias significativas entre los diferentes puntos de muestreo, aspecto útil, al momento de implementar el diseño de estudio.
- Las mediciones de metales pesados en la especie reflejan la presencia de aluminio predominantemente, debido a que, es el principal compuesto que se encuentra presente en varias partes de los vehículos como en el caucho de las llantas que se va desgastando y forma parte de los elementos que componen los aceites y los combustibles.
- La especie *Tillandsia* sirve como un bioindicador de la calidad del aire puesto que retiene compuestos metálicos durante largos periodos de tiempo, lo cual influye en su crecimiento, ya que, tiene dependencia con las condiciones ambientales en las que se encuentra.
- El uso de tecnologías alternativas de bajo costo nos permitió medir tendencias de la contaminación que se encuentra presente en el ambiente, para con ello tener una información referente y muy aproximada de cómo se encuentra la calidad del aire en la ciudad.
- La incidencia del tráfico vehicular en la calidad del aire en la ciudad es relativamente leve, puesto que sólo el polvo sedimentable fue el único que sobrepasó los LMP.

## **9. Recomendaciones**

Se recomienda, el estudio a profundidad de especies pioneras para el biomonitoreo, ya que esto nos puede permitir seleccionar especies específicas para cada recurso que se requiera estudiar, siendo más precisos con la información que se obtenga. De esta forma, innovamos nuestros conocimientos y damos paso a que más estudiantes se motiven a trabajar con organismos altamente sensibles a la contaminación.

También, se recomienda la alianza con otras instituciones que contribuyan al desarrollo académico, con la finalidad de poder formar profesionales capacitados, con diversos conocimientos y habilidades para desempeñarse eficientemente en la sociedad.

Finalmente, se recomienda realizar más estudios en lo que respecta al recurso aire, puesto que es un factor inherente a cualquier forma de vida, y debemos procurar su cuidado.

## 10. Bibliografía

- Alcaraz, D. F. (2012). Temperatura, luz, atmósfera, viento. En D. F. Alcaraz, *Geobotánica* (págs. 1-3). California: 559 Nathan Abbott Way
- Alcaraz, F. J. (2012). Temperatura, luz, atmósfera, viento. En F. J. Alcaraz, *Geobotánica* (págs. 1-3). California: 559 Nathan Abbott Way.
- APTI. (2011). Conceptos básicos sobre meteorología de la contaminación del aire. USA: centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente.
- Ávila, G. M. (2016). *Partículas Sedimentables del Aire y su Influencia en las Infecciones Respiratorias Agudas En La Ciudad de Tayabamba*". Tingo María – Perú.
- Baldellou, R., Martínez, J., Ayestarán, B., y Infante, J. (2018, mayo 20). *Una red biomonitores analiza la calidad del aire de Logroño*.  
<https://www.unirioja.es/apnoticias/servlet/Noticias?codnot=5454yaccion=detnot>
- Beltrán-Hernández, R. I., Del Razo, L. M., Vázquez-Rodríguez, G., Lucho-Constantino, C., y Calvario, C. (2012). Biomonitorio de la contaminación metálica atmosférica con *Tillandsia usneoides* L., en Tlaxcoapan, Hidalgo. (pp. 150-161).
- Beltrán, I., Del Razo, L. M., Vázquez, G., y Lucho-Constantino, C. (2012). (PDF) *Biomonitorio de la contaminación metálica atmosférica con Tillandsia usneoides L., en Tlaxcoapan, Hidalgo*.  
[https://www.researchgate.net/publication/291332955\\_Biomonitorio\\_de\\_la\\_contaminacion\\_metalica\\_atmosferica\\_con\\_Tillandsia\\_usneoides\\_L\\_en\\_Tlaxcoapan\\_Hidalgo?enrichId=rgreq-18ac5d4abc9a052d076d0556a4ed8777-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI5MTMzMjk1NTtBUzozMjAzNjg2MzAyNzIwMDJAMTQ1MzM5MzI0MjAxMA%3D%3D&el=1\\_x\\_2y\\_esc=publicationCoverPdf](https://www.researchgate.net/publication/291332955_Biomonitorio_de_la_contaminacion_metalica_atmosferica_con_Tillandsia_usneoides_L_en_Tlaxcoapan_Hidalgo?enrichId=rgreq-18ac5d4abc9a052d076d0556a4ed8777-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzI5MTMzMjk1NTtBUzozMjAzNjg2MzAyNzIwMDJAMTQ1MzM5MzI0MjAxMA%3D%3D&el=1_x_2y_esc=publicationCoverPdf)
- Benítez, Á., Medina, J., Vázquez, C., Loaiza, T., Luzuriaga, Y., y Calva, J. (2019). Lichens and Bromeliads as Bioindicators of Heavy Metal Deposition in Ecuador. *Diversity*, 11(2), 28. <https://doi.org/10.3390/d11020028>
- Cardona, M. E. R., Oviedo, J. C., M, S. S., y A, W. A. G. (2008). Biomonitorio de metales pesados empleando herramientas de SIG en el valle del Aburra. *Investigaciones Aplicadas*, 2(1), 7-14.

- Cinco Noticias. (25 de abril de 2018). *Cinco Noticias*. Obtenido de Cinco Noticias: <https://www.cinconoticias.com/estas-son-las-consecuencias-de-la-contaminacion-del-aire/>
- Cortés, J. L., Bautista, F., Delgado, C., Quintana, P., Aguilar, D., García, A., Figueroa, C., Gogichaishvili, A., Cortés, J. L., Bautista, F., Delgado, C., Quintana, P., Aguilar, D., García, A., Figueroa, C., y Gogichaishvili, A. (2017). Distribución espacial de los metales pesados en polvos urbanos de la ciudad de Ensenada, Baja California, México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 23(1), 47-60. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2016.02.005>
- Cheng, Z., Luo, L., Wang, S., Wang, Y., Sharma, S., Shimadera, H., Wang, X., Bressi, M., de Miranda, R. M., Jiang, J., Zhou, W., Fajardo, O., Yan, N., y Hao, J. (2016). Status and characteristics of ambient PM 2,5 pollution in global megacities. *Environment International*, 89-90, 212–221.
- DIGESA. (2005). Protocolo De Monitoreo De La Calidad Del Aire Y Gestión De Los Datos . En Digesa, *Protocolo De Monitoreo De La Calidad Del Aire Y Gestión De Los Datos* (pág. 71). CUSCO.
- Ding, N., Dai, Q., y Fan, Y. (2021). Design of Arduino PM 2,5 Air Quality Monitoring System. *2021 IEEE International Conference on Power Electronics, Computer Applications (ICPECA)*, 798-800. <https://doi.org/10.1109/ICPECA51329.2021.9362553>
- Direct Industry. (2019). *Direct Industry*. Obtenido de Direct Industry: <http://www.directindustry.es/prod/comde-derenda-gmbh/product-107207-1863408.html>
- D. Drapper, R. Tomlinson, P. Williams. (2000). “Pollutant concentrations in road runoff: Southeast Queensland case study”. *J. Environ. Eng.* Vol. 126. pp. 313- 319
- ECLAC's. (2015). *Statistical Yearbook for Latin America and the Caribbean 2014*. CEPAL.
- Elias, L., y Aoyama, E. (2019). ANATOMIA FOLIAR E HISTOQUÍMICA DE Tillandsia usneoides (L.) L. (BROMELIACEAE). *Enciclopédia Biosfera*, 16(29), 198-208. [https://doi.org/10.18677/EnciBio\\_2019A14](https://doi.org/10.18677/EnciBio_2019A14)

- EPA. (31 de JANUARY de 2017). *AIR NOW*. Obtenido de AIR NOW: <https://cfpub.epa.gov/airnow/index.cfm?action=aqibasics.particle>
- EPA. (17 de JANUARY de 2017). Particulate Matter (PM 10) Trends. USA.
- Faller, E., Kanes S., N., Zajmi, A., y Ramli M., D. (2017). In Vitro Antibacterial Activity of Spanish Moss (*Tillandsia usneoides*) Crude Extract Against Skin Infection in Wound Healing. *International Journal of Pharmacognosy and Phytochemical Research*, 9(10). <https://doi.org/10.25258/phyto.v9i10.10459>
- Figueiredo, A.M.G. Nogueira, C.A. Saiki, m. Milian, F. M. Domingos, M. Assessment of atmospheric metallic pollution in the metropolitan region of Sao Paulo, Brazil, employing *Tillandsia usneoides* L. as biomonitor. *Environmental Pollution* 145 (2007) 279 – 292
- Figueiredo, A.M.G. Nogueira, C.A. Saiki, m. Milian, F. M. Domingos, M. (2007). Assessment of atmospheric metallic pollution in the metropolitan region of Sao Paulo, Brazil, employing *Tillandsia usneoides* L. as biomonitor. *Environmental Pollution* 145. Pág. 279 - 292
- FSG (Fundacion para la Salud Geoambiental). (2013). *FUNDACION PARA SALUD GEOAMBIENTAL*. Obtenido de FUNDACION PARA SALUD GEOAMBIENTAL: <https://www.saludgeoambiental.org/material-particulado>
- GAD Loja. (2014). *Plan de Ordenamiento Territorial. Loja*, Ecuador.
- Gálvez, A., González, C., Franco, J., Morales, R., Rincón, J., y Aristizábal, B. (2020, octubre 22). *Monitoreo de material particulado fino y carbono negro, en microambientes de la ciudad andina de Manizales: Estudio piloto*.
- GEO-LOJA. (2007). *Geo-Loja: Perspectivas del Medio Ambiente Urbano de Loja*. Loja, Ecuador.
- Giuliani, D. S. (2020). *Especiación de compuestos asociados a material particulado (MP<SUB>10</SUB> y MP<SUB>2.5</SUB>) en La Plata y alrededores: Metales, hidrocarburos policíclicos aromáticos, simples y derivados* [Tesis, Universidad Nacional de La Plata]. <https://doi.org/10.35537/10915/110949>

Gobierno Provincial de Loja. (2011). *Plan de Ordenamiento Provincial de Loja: Sistema Ambiental*. Loja, Ecuador.

Guasgua, J. F. A., Campaña, G. G. R., Paredes, M. E. G., Guasgua, J. F. A., Campaña, G. G. R., y Paredes, M. E. G. (2016). Estudio comparativo de gases contaminantes en un vehículo M1, utilizando gasolina de la Comunidad Andina. *Enfoque UTE*, 7(3), 110-119, <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v7n3.109>.

Hall, E. S., Kaushik, S. M., Vanderpool, R. W., Duvall, R. M., Beaver, M. R., Long, R. W., y Solomon, P. A. (2014). Integrating Sensor Monitoring Technology into the Current Air Pollution Regulatory Support Paradigm: Practical Considerations. *American Journal of Environmental Engineering*, 4(6), 147-154

Hernández, O. H. Á., Montañó, T., Maldonado, J., Caraballo, M. A., Ojeda, C. G. S., Granda, J. C., y Castillo, B. S. (2016). Método de selección para la ubicación de puntos de monitoreo de gases de combustión provenientes de fuentes fijas puntuales en la ciudad de Loja, Ecuador. *Revista Tecnológica - ESPOL*, 29(2), Article 2. <http://www.rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/497>

Hernandez, W., Mendez, A., Diaz-Marquez, A. M., y Zalakeviciute, R. (2020). PM 2,5 Concentration Measurement Analysis by Using Non-Parametric Statistical Inference. *IEEE Sensors Journal*, 20(2), 1084-1094. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2945581>

Hernandez, W., Mendez, A., Diaz-Marquez, A. M., y Zalakeviciute, R. (2020). PM 2,5 Concentration Measurement Analysis by Using Non-Parametric Statistical Inference. *IEEE Sensors Journal*, 20(2), 1084-1094. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2019.2945581>

Herrera, J., y Rodríguez, S. (2011). Validación de un método de análisis para la determinación de metales pesados en partículas PM 10 colectadas en aire ambiente. *Revista Tecnología en Marcha*; Vol. 23, Núm. 3 (2010); pág. 33. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/8883>

Hidrovo Contreras, D. G., Meza Zambrano, E. K., y Romero Peña, F. G. (2016). *IMPACTO AMBIENTAL DEL PARQUE AUTOMOTOR DEL CANTÓN QUEVEDO*. <https://www.eumed.net/rev/caribe/2016/10/automotor.html>

- Hussein, T., Alameer, A., Jaghbeir, O., Albeitshaweesh, K., Malkawi, M., Boor, B. E., Koivisto, A. J., Löndahl, J., Alrifai, O., y Al-Hunaiti, A. (2020). Indoor Particle Concentrations, Size Distributions, and Exposures in Middle Eastern Microenvironments. *Atmosphere*, 11(1), 41. <https://doi.org/10.3390/atmos11010041>
- INECC. (15 de 11 de 2007). *Instituto nacional de Ecología y Cambio Climático*. Obtenido de Instituto nacional de Ecología y Cambio Climático: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/459/cap3.html>
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2010). Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Loja.
- Inzunza, J. (2004). Meteorología descriptiva. en J. Inzunza, meteorología descriptiva (págs. 86-115). Chile: Revista Geográfica del Sur.
- J. Glynn Henry; Gary W. Heinke; Héctor Javier Escalona y García. (1999). *ingeniería ambiental*. Mexico: Pearson Educación.
- José Huallaro B., H. L. (2005). Centro de Desarrollo e Investigación en Termofluidos CEDIT. *Validación Del Método De Tubos Pasivos Con Filtros Colectores Para Determinar La Concentración De Material Sólido Sedimentable En La Ciudad Universitaria De San Marcos* . (pág. 42). San Marcos-Peru: Cedit.
- Kabata-Pendias, A. 2000. Trace elements in soils and plants. Third Edition. CRC Press, Inc. Boca Raton. USA. pp. 365, 413.
- Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., Di Sabatino, S., Bell, M., Norford, L., y Britter, R. (2015). The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environment International*, 75, 199–205
- Loaiza, T., y Luzuriaga, Y. (2016). *Detección de la contaminación atmosférica por metales pesados mediante el uso de epífitos (bromelias, briófitos y líquenes), en diferentes zonas de la ciudad de Loja*.
- López, J. F. (2018). Hispanoteca. Obtenido de Hispanoteca:<http://www.hispanoteca.eu/Hispanoam%C3%A9rica/Mapas/Corrientes%20oce%C3%A1nicas.htm>
- LORENZI, H. Plantas daninhas do Brasil: terrestres, aquáticas, parasitas e tóxicas. 3. ed. Nova

- Odessa: Instituto Plantarum, 2000. 608p.
- Machado, A., García, N., García, C., Acosta, L., Córdova, A., Linares, M., Giraldoth, D., y Velásquez, H. (2008). Contaminación por metales (Pb, Zn, Ni y Cr) en aire, sedimentos viales y suelo en una zona de alto tráfico vehicular. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 24(4), 171-182.
- Mafuyai, G. M., Eneji, I. S., y Sha’Ato, R. (2014). Concentration of Heavy Metals in Respirable Dust in Jos Metropolitan Area, Nigeria. *Open Journal of Air Pollution*, 3(1), 10-19. <https://doi.org/10.4236/ojap.2014.31002>
- Martinez, E., y Díaz., Y. (2004). *CONTAMINACION ATMOSFERICA*. CUENCA: SERVICIO DE PUBLICACIONES DE LA UNIVERSIDAD DE CASTILLA- LA MANCHA .
- Martins, L. D., Hallak, R., Alves, R. C., Almeida, D. S. de, Squizzato, R., Moreira, C. A. B., Beal, A., Silva, I. da, Rudke, A., y Martins, J. A. (2018). Long-range Transport of Aerosols from Biomass Burning over Southeastern South America and their Implications on Air Quality. *Aerosol and Air Quality Research*, 18(7), 1734-1745. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.11.0545>
- Merma, W. M., Mamani, C. J. L., Mamani, D. L. F., Alvarez, J. L. C., Alanoca, R. C., y Choquecota, J. Q. (2021). CONCENTRACIÓN Y DISPERSIÓN DE POLVO SEDIMENTABLE Y MATERIAL PARTICULADO PM 10 A CAUSA DEL TRAFICO VEHICULAR EN PERIODO ESTIAJE, EN LA ZONA DEL CERCADO DE LA CIUDAD DE ILAVE. *Ceprosimad*, 9(1), 06-14.
- Ministerio de Ambiente Vivivenda y Desarrollo Territorial. (FEBRERO de 2008). anual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire. . En M. d. Territorial, *Protocolo Para El Monitoreo Y Seguimiento de La Calidad Del Aire* (pág. 137). BOGOTA. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/Protocolo+para+el+Monitoreo+y+seguimiento+de+la+calidad+del+aire.pdf/6b2f53c8-6a8d-4f3d-b210-011a45f3ee88>
- Minelli, A., Ravanelli, M., Brighignal, L y Ercoli, L. 1997. The use an epiphyte (*Tillandsia caput – medusae morren*) as bioindicator of air pollution in Costa Rica. *The Science of the Total Enviromenment*. v. 198. p 176-180.

- Mora, J. C., Sibaja, J. P., y Borbón, H. (2021). *Fuentes antropogénicas y naturales de contaminación atmosférica: Estado del arte de su impacto en la calidad fisicoquímica en el agua de lluvia y de niebla.* | *Revista Tecnología en Marcha.* [https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/view/4806](https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/4806)
- Mulgrew, Angela. Williams, Peter. (2000). Biomonitoring of Air Quality Using Plants. II HEAVY METALS. Higher plants. Pg: 45- 57. WHO Collaborating Centre for Air Quality Management and Air Pollution Control (WHO CC)
- Municipio de Loja. (2005). *PLAN PARTICIPATIVO DE FORTALECIMIENTO DE LA DEMOCRACIA Y DESARROLLO DEL CANTON LOJA.*
- Muñoz Chamba, L. F. (2015). *Ordenamiento Territorial del Parque Universitario PUEAR mediante SIG, Loja-Ecuador.* University of Salzburg.
- Noriega, P. (2008). *Biomonitoreo de contaminantes, mediante el uso de briofitas como muestreadores biológicos, para el aire de la ciudad de Quito.*
- Noriega, P., Medici, A., Murillo, A., Bedón, J., Haro, F., y Galecio, G. (2008). Estudio de la concentración de cadmio y plomo en el aire de la ciudad de Quito, empleando briofitas como biomonitores. *La Granja. Revista de Ciencias de la Vida*, 8(2), 17-24.
- Pablo, O., kelia, G., Regina, C., Roberto, D., María del Rosario, a., y Vasco, D. (2001). *Programa Aire Puro Monitoreo del Aire.* Suiza.
- Perez, P., Gonzalez, E., y Miñana, A. (1993). *MUESTREO DE CONTAMINANCITES EN EL AIRE POR CAPTACION PASIVA.* MURCIA: POBLAGRÁAFIC S.A.
- Placeres, M. R., Olite, L. F., y Toste, D. M. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 44.
- Portillo, G. (10 de abril de 2008). *METEOROLOGIA EN RED.* Obtenido de METEOROLOGIA EN RED: <https://www.meteorologiaenred.com/la-nieve.html>
- PNUMA-ONU. (2002). *Manuales de Metodología de GEMS/Aire. Aseguramiento de la calidad en el monitoreo de la calidad del aire urbano.*
- Ramírez, M., Oviedo, J. C., Salazar, S., y Giraldo, W. (2008). *BIOMONITOREO DE METALES PESADOS EMPLEANDO HERRAMIENTAS DEL SIG EN EL VALLE DEL ABURRA.* 7-14.
- Ramírez, C. A. G., Gutiérrez, A. D. R., García, F. P., y Méndez, J. P. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29-44.

- Rodríguez , R., Águeda , B., y Portela Lozano, A. (2004). UNIDAD DIDACTICA: Meteorología y Climatología. En R. M. Rodríguez, B. C. Águeda, y A. Portela Lozano, *Meteorología y Climatología* (págs. 20-21). FECYT (Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología).
- Roy-García, Ivonne, Rivas-Ruiz, Rodolfo, Pérez-Rodríguez, Marcela, y Palacios-Cruz, Lino. (2019). Correlación: no toda correlación implica causalidad. *Revista alergia México*, 66(3), 354-360. Epub 19 de febrero de 2020. <https://doi.org/10.29262/ram.v66i3.651>
- Schlesinger, W. H., y Marks, P. L. (1977). Mineral Cycling and the Niche of Spanish Moss, *Tillandsia Usneoides* L. *American Journal of Botany*, 64(10), 1254-1262. <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1977.tb10819.x>
- SEMARNAT. (2018). *Fuentes de Contaminación Atmosférica*. gob.mx. <http://www.gob.mx/semarnat/articulos/fuentes-de-contaminacion-atmosferica>
- TULSMA-MAATE. (2017). *NORMA DE CALIDAD DEL AIRE AMBIENTE. LIBRO VI, ANEXO 4*. Registro Oficial Edición Especial 2 de 31-mar.-2003
- TROPOSFERA. (2010). *TROPOSFERA*. Obtenido de TROPOSFERA: <http://www.troposfera.org/conceptos/calidad-aire/>
- Urrutia Llerena, B. F. (2021). *Estimación de la concentración de material particulado sedimentable en el centro histórico de la Ciudad de Riobamba*. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/8492>
- United Nations. (2013). *Revision of World Population Prospects*. NEW YORK.
- Universidad del Azuay. (2022). *Datos meteorológicos de la estación 1 de monitoreo*. Azuay
- Vassallo, J. M., y Bueno, P. C. (2019). *Transport Challenges in Latin American Cities: Lessons Learnt from Policy Experiences*. Inter-American Development Bank.
- WHO. (2016). *Air pollution levels rising in many of the world's poorest cities*. <https://www.who.int/news-room/detail/12-05-2016-air-pollution-levels-rising-in-many-of-the-world-s-poorest-cities>
- Xing, Y.-F., Xu, Y.-H., Shi, M.-H., y Lian, Y.-X. (2016). The impact of PM 2,5 on the human respiratory system. *Journal of Thoracic Disease*, 8(1), E69-E74-E74. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2072-1439.2016.01.19>

Yauri Molina, H., y Vilca Monroy, X. R. (2021). *Biomonitoreo de elementos traza en área urbana e industrial de Lurigancho—Chosica, utilizando las especies Tillandsia latifolia y T. purpurea como biomonitores*. <http://200.121.226.32:8080/handle/UPEU/4477>

## 11. Anexos

Esta sección contiene información adicional del estudio.

**Anexo 1.** Registro de carga vehicular tabulado en Excel

	A	B	C	D	E	F
1	Fecha	Hora	Punto	Tipo Vehiculo	Combustible	Cant. Vehiculos
2	8/11/2021	7h42	Punto 6	Liviano	Gasolina	12
3	8/11/2021	7h42	Punto 6	Pesado	Diesel	5
4	8/11/2021	7h42	Punto 6	Pesado	Diesel	2
5	8/11/2021	7h45	Punto 6	Liviano	Gasolina	11
6	8/11/2021	7h45	Punto 6	Pesado	Diesel	4
7	8/11/2021	7h45	Punto 6	Pesado	Diesel	2
8	8/11/2021	7h47	Punto 6	Liviano	Gasolina	21
9	8/11/2021	7h47	Punto 6	Pesado	Diesel	4
10	8/11/2021	7h47	Punto 6	Pesado	Diesel	0
11	8/11/2021	7h50	Punto 4	Liviano	Gasolina	18
12	8/11/2021	7h50	Punto 4	Pesado	Diesel	4
13	8/11/2021	7h50	Punto 4	Pesado	Diesel	0
14	8/11/2021	7h52	Punto 4	Liviano	Gasolina	16
15	8/11/2021	7h52	Punto 4	Pesado	Diesel	5
16	8/11/2021	7h52	Punto 4	Pesado	Diesel	0
17	8/11/2021	7h54	Punto 4	Liviano	Gasolina	22
18	8/11/2021	7h54	Punto 4	Pesado	Diesel	3
19	8/11/2021	7h54	Punto 4	Pesado	Diesel	2
20	8/11/2021	8h03	Punto 5	Liviano	Gasolina	12
21	8/11/2021	8h03	Punto 5	Pesado	Diesel	4
22	8/11/2021	8h03	Punto 5	Pesado	Diesel	0
23	8/11/2021	8h05	Punto 5	Liviano	Gasolina	11
24	8/11/2021	8h05	Punto 5	Pesado	Diesel	1
25	8/11/2021	8h05	Punto 5	Pesado	Diesel	0
26	8/11/2021	8h07	Punto 5	Liviano	Gasolina	15
27	8/11/2021	8h07	Punto 5	Pesado	Diesel	4
28	8/11/2021	8h07	Punto 5	Pesado	Diesel	1
29	8/11/2021	8h18	Punto 3	Liviano	Gasolina	0
30	8/11/2021	8h18	Punto 3	Pesado	Diesel	2
31	8/11/2021	8h18	Punto 3	Pesado	Diesel	0
32	8/11/2021	8h20	Punto 3	Liviano	Gasolina	0
33	8/11/2021	8h20	Punto 3	Pesado	Diesel	0
34	8/11/2021	8h20	Punto 3	Pesado	Diesel	0
35	8/11/2021	8h22	Punto 3	Liviano	Gasolina	0

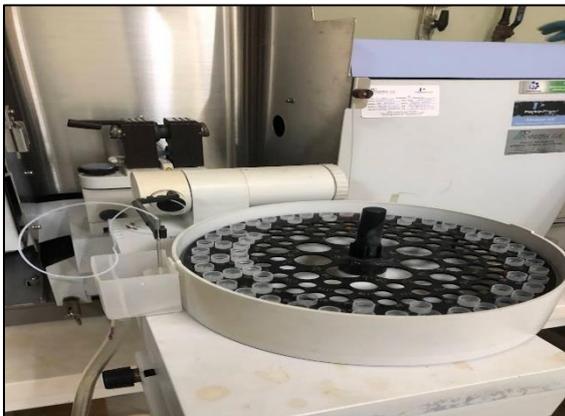
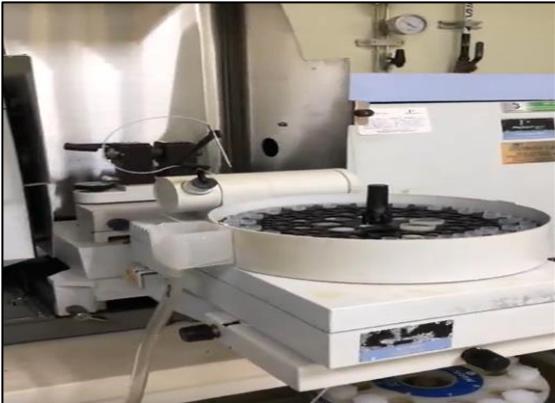
Anexo 2. Recolección de las muestras de Tillandsia usneoides



### Anexo 3. Procesamiento de la especie en el laboratorio



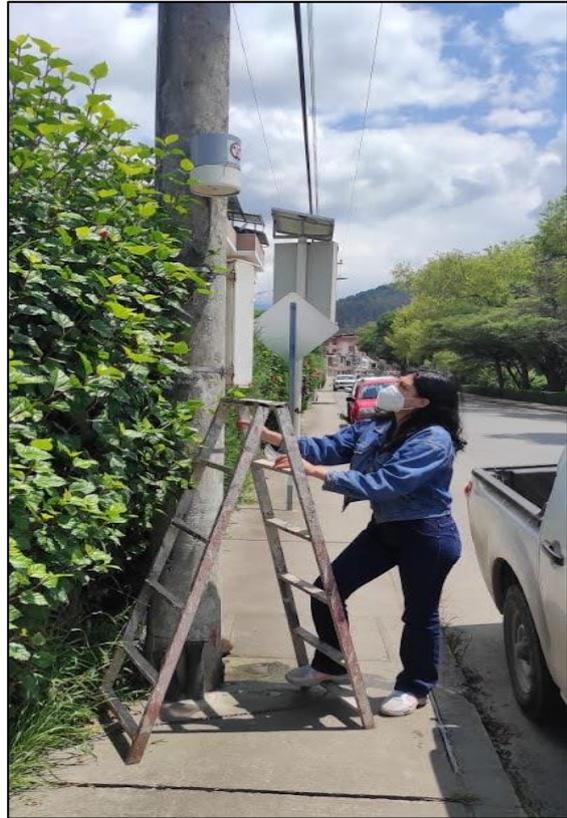
### Anexo 4. Análisis de metales pesados obtenidos de Tillandsia usneoides.



**Anexo 3.** Colocación del Sensor Arduino Uno en los diferentes sitios de muestreo



Anexo 4. Colocación de colectores pasivos y cambios de filtros.



**Anexo 5. Pesos obtenidos del Análisis Gravimétrico en el segundo cambio de filtros**

Cod	Estrato	Peso Inicial	Peso Final	Concentración g/cm2	Concentración en mg/cm2
P1-01	P.C	1,4452	1,5572	0,002551798	2,551797793
P1-02	P.C	1,4744	1,5609	0,001970808	1,970808117
P2-01	P.C	1,4663	1,6223	0,00355429	3,554289783
P2-02	P.C	1,4627	1,5865	0,002820648	2,820647917
P3-01	P.C	1,439	1,5833	0,003287718	3,287718049
P3-02	P.C	1,491	1,5824	0,002082449	2,08244927
P4-01	S	1,497	1,7082	0,004811962	4,811961552
P4-02	S	1,5285	1,6755	0,003349235	3,349234603
P5-01	S	1,4991	1,5921	0,002118904	2,118903524
P5-02	S	1,4828	1,5992	0,002652047	2,652046992
P6-01	S	1,4767	1,6136	0,003119117	3,119117124
P6-02	S	1,4886	1,6577	0,003852759	3,852758989
P7-01	C	1,4648	1,5811	0,002649769	2,649768601
P7-02	C	1,4954	1,6132	0,002683944	2,683944464
P8-01	C	1,4281	1,5368	0,002476611	2,476610894
P8-02	C	1,4714	1,6058	0,003062157	3,062157351
P9-01	C	1,5049	1,711	0,004695764	4,695763617
P9-02	C	1,5227	1,6593	0,003112282	3,112281951
P10-01	N	1,4618	1,6236	0,003686436	3,686436454
P10-02	N	1,4811	1,6994	0,004973727	4,973727305
P11-01	N	1,4668	2,5058	0,023672481	23,67248131
P11-02	N	1,3419	1,5057	0,003732004	3,732004272
P12-01	N	1,3274	1,5011	0,003957565	3,95756497
P12-02	N	1,5124	1,6535	0,00321481	3,214809541

P1-01	P.C	1,3632	1,4561	0,002116625	2,116625133
P1-02	P.C	1,3836	1,4384	0,001248558	1,248558206
P2-01	P.C	1,3791	1,4825	0,002355856	2,355856177
P2-02	P.C	1,4272	1,5218	0,002155358	2,155357779
P3-01	P.C	1,3056	1,3289	0,000530865	0,530865077
P3-02	P.C	1,3021	1,384	0,001866002	1,866002136
P4-01	S	1,4457	1,6858	0,005470417	5,470416518
P4-02	S	1,3822	1,3998	0,000400997	0,400996796
P5-01	S	1,3765	1,5126	0,00310089	3,100889996
P5-02	S	1,3021	1,384	0,001866002	1,866002136
P6-01	S	1,3817	1,3854	8,43005E-05	0,084300463
P6-02	S	1,3556	1,5513	0,004458811	4,458810965
P7-01	C	1,403	1,4263	0,000530865	0,530865077
P7-02	C	1,3919	1,499	0,002440157	2,440156639
P8-01	C	1,4803	1,6225	0,003239872	3,239871841
P8-02	C	1,4505	1,6938	0,005543325	5,543325027
P9-01	C	1,3825	1,5905	0,004739053	4,739053044
P9-02	C	1,419	1,4617	0,000972873	0,972872909
P10-01	N	1,383	1,6938	0,007081239	7,081238875
P10-02	N	1,3472	1,569	0,005053471	5,053470986
P11-01	N	1,4085	1,6416	0,005310929	5,310929156
P11-02	N	1,4328	1,9405	0,011567391	11,56739053
P12-01	N	1,405	1,6194	0,00488487	4,884870061
P12-02	N	1,2811	1,4121	0,002984692	2,984692061

**Anexo 8.** Análisis químico del polvo sedimentable para la obtención de metales traza



**Anexo 9.** Clasificación de los vehículos por tipo y por combustible

<b>Por Tipo</b>	<b>Por Combustible</b>
Livianos y Pesados	Diesel y Gasolina
	
	
	

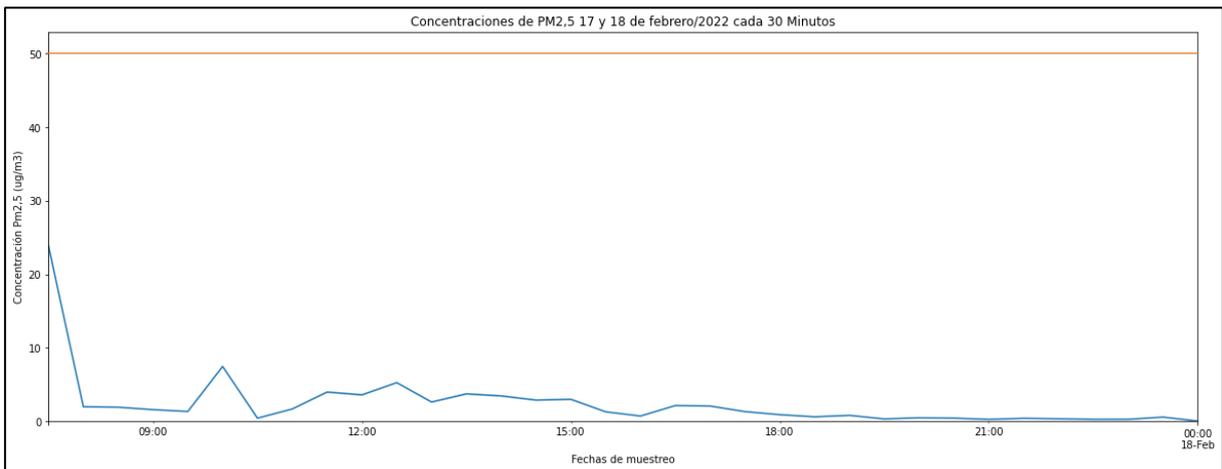
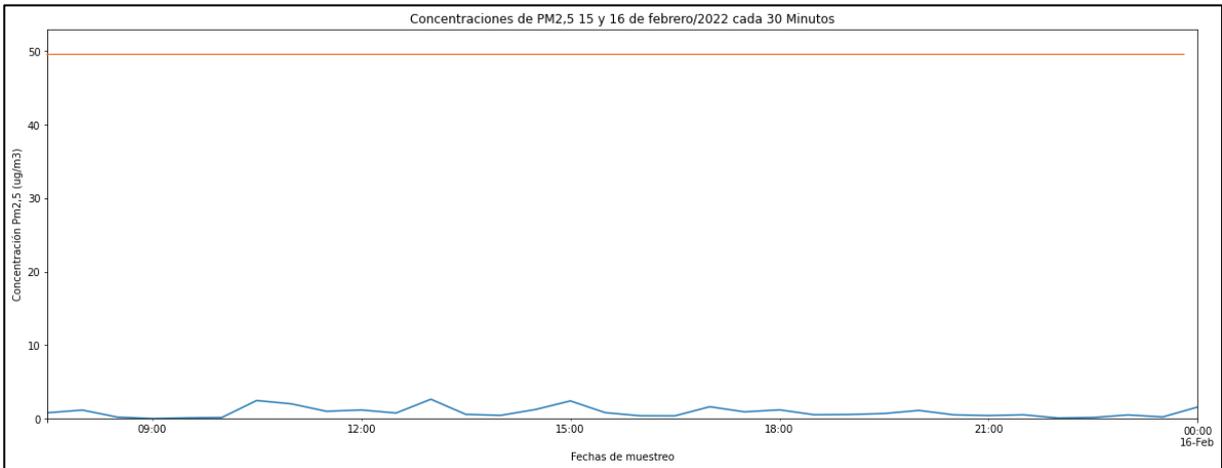
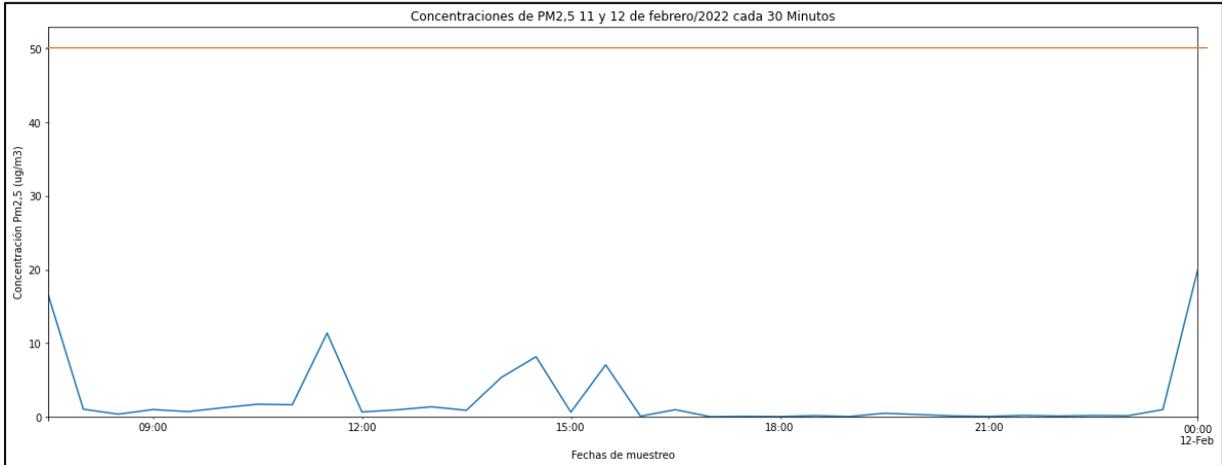
**Tipos de  
vehículos**

**Anexo 6. Concentraciones de Plomo y Cadmio**

<b>SampleID</b>	<b>Analyte</b>	<b>Mean</b>
Calib Std 5	Pb 283.31	[25] ug/L
p1-01	Pb 283.31	-4.100 ug/L
p1-02	Pb 283.31	-4.575 ug/L
p2-01	Pb 283.31	-5.394 ug/L
p2-02	Pb 283.31	-5.914 ug/L
p2-03	Pb 283.31	-6.209 ug/L
p3-01	Pb 283.31	-4.545 ug/L
p3-02	Pb 283.31	-5.699 ug/L
p3-03	Pb 283.31	-5.104 ug/L
p3-04	Pb 283.31	-5.436 ug/L
p3-05	Pb 283.31	-1.490 ug/L
p4-01	Pb 283.31	-3.713 ug/L
p4-02	Pb 283.31	-2.781 ug/L
p4-03	Pb 283.31	-2.005 ug/L
p4-04	Pb 283.31	-3.781 ug/L
p4-05	Pb 283.31	-3.048 ug/L
p5-01	Pb 283.31	-2.117 ug/L
p5-02	Pb 283.31	-1.657 ug/L
p5-03	Pb 283.31	-4.342 ug/L
p5-04	Pb 283.31	-3.553 ug/L
p5-05	Pb 283.31	-2.684 ug/L
p6-01	Pb 283.31	-2.286 ug/L
p6-02	Pb 283.31	-4.477 ug/L
p6-03	Pb 283.31	-3.036 ug/L

SampleID	Analyte	Mean
p3-04	Cd 228.80	-0.2852 ug/L
p3-05	Cd 228.80	-0.3170 ug/L
p4-01	Cd 228.80	-0.3339 ug/L
p4-02	Cd 228.80	-0.3425 ug/L
p4-03	Cd 228.80	0.8665 ug/L
p4-04	Cd 228.80	-0.3368 ug/L
p4-05	Cd 228.80	-0.3010 ug/L
p5-01	Cd 228.80	-0.3204 ug/L
p5-02	Cd 228.80	-0.2984 ug/L
p5-03	Cd 228.80	-0.2815 ug/L
p5-04	Cd 228.80	-0.3141 ug/L
p5-05	Cd 228.80	-0.2421 ug/L
p6-01	Cd 228.80	-0.2094 ug/L
p6-02	Cd 228.80	-0.2499 ug/L
p6-03	Cd 228.80	-0.2320 ug/L
p6-04	Cd 228.80	-0.2857 ug/L
p6-05	Cd 228.80	-0.1545 ug/L
p7-01	Cd 228.80	-0.2877 ug/L
p7-02	Cd 228.80	-0.3032 ug/L
p7-03	Cd 228.80	-0.3002 ug/L
p7-04	Cd 228.80	-0.2599 ug/L
p7-05	Cd 228.80	-0.3112 ug/L
p8-01	Cd 228.80	-0.2838 ug/L
p8-02	Cd 228.80	-0.2843 ug/L

### Anexo 7. Concentraciones de PM 2,5 cada 30 minutos



**Anexo 8. Certificación de traducción del Resumen (Abstract)**

**CERTIFICACIÓN DE TRADUCCIÓN DEL RESUMEN (ABSTRACT)**

Gabriela Armijos Samaniego

**LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA EDUCACION MENCION IDIOMA INGLES**

**Certifico:**

Que he traducido minuciosamente el Resumen del Trabajo de Titulación titulado:

“Influencia del tráfico vehicular en la calidad del aire de la ciudad de Loja a través del biomonitoreo de *Tillandsia usneoides*” de autoría de **María Belén Cango González**, egresada de la Carrera de Ingeniería en Manejo y Conservación del Medio Ambiente en la Facultad Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Nacional de Loja, previa a la obtención del título de Ingeniero en Manejo y Conservación del Medio Ambiente.

Es todo lo que puedo certificar en honor a la verdad, autorizando a la interesada hacer uso del presente en lo que estime conveniente.

Loja, 7 de febrero del 2023



Gabriela Armijos Samaniego

**LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA EDUCACION MENCION IDIOMA INGLES**

CI: 1104501687

Celular: 0989162523