

**Dinámica de los NO<sub>x</sub> como principales precursores fotoquímicos del ozono troposférico en la ciudad de Bogotá durante el año 2020**

Gynna Daniela Munevar León

Trabajo de Grado para optar al Título de Especialista en Química Ambiental

Director

Leonardo Alfredo Pineda Pardo

Mg. En ciencias Ambientales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Química

Especialización en Química Ambiental

Bucaramanga

2022

### **Dedicatoria**

El presente trabajo de grado lo dedico a mis padres y esposo, quienes han sido un pilar de fuerza y de motivación constante en esta etapa de mi vida profesional. Su consejo y apoyo permitieron su adecuado desarrollo y exitosa culminación.

### **Agradecimientos**

En primer lugar, manifiesto total gratitud a Dios mi padre celestial; quien por su bondad e inagotable amor me ha dado la fuerza para continuar día a día trabajando por mis metas y sueños y quien con su provisión me ha permitido tener los recursos económicos e intelectuales para la culminación de este proyecto académico.

Al director de proyecto, Ing. Leonardo Pineda, cuyo conocimiento intelectual y habilidades profesionales fueron un soporte permanente para el satisfactorio desarrollo del proyecto.

A mi esposo, quien, con su constante amor, apoyo y comprensión, ha permitido que este paso dado para mi crecimiento profesional sea una realidad, gracias porque nunca me negaste tu ayuda y provisión.

A mis padres, porque su constante acompañamiento y consejo, permitieron la formación de una persona disciplinada, integra y profesional. Sus valores, han sido mi norte para superar los retos en la vida.

**Tabla de contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	16
1. Objetivos.....	18
1.1 Objetivo General.....	18
1.2 Objetivos Específicos: .....	18
2. Generalidades de la química atmosférica y sus contaminantes.....	19
2.1 Composición y estructura vertical de la atmósfera. ....	19
2.1.1 Composición química de la atmósfera. ....	19
1.1.2 Estructura de la atmósfera y su perfil de temperatura.....	22
1.1.3 La troposfera. ....	25
1.1.4 Radiación solar y procesos fotoquímicos en la troposfera.....	26
1.2 Contaminación y contaminantes atmosféricos.....	32
1.2.1 Monóxido de Carbono (CO) y Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> ). ....	33
1.2.2 Dióxidos de azufre (SO <sub>x</sub> ).....	34
1.2.3 Material particulado (PM <sub>10</sub> y PM <sub>2,5</sub> ). ....	34
1.2.4 Oxidantes fotoquímicos.....	35
1.2.5 Hidrocarburos aromáticos policíclicos – HAP.....	36
1.2.6 Contaminantes atmosféricos y Calidad del Aire en Colombia. ....	36

1.3 Óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ). .....	38
1.3.1 Oxido de dinitrógeno (Óxido Nitroso-N <sub>2</sub> O).....	40
1.3.2 Óxido de nitrógeno (óxido nítrico – NO) y dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ).....	41
1.4 Ozono troposférico (O <sub>3</sub> ).....	44
1.5 Fuentes de contaminación atmosférica en áreas urbanas.....	51
1.6 Dinámica de la contaminación en la atmósfera. ....	53
1.7 Red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá – RMCAB.....	55
2. Reporte del inventario de emisiones de fuentes fijas y móviles a nivel local en la ciudad de Bogotá.....	57
2.1 Inventario de Emisiones de NO <sub>x</sub> por combustión de Fuentes móviles en carretera. ....	63
2.2 Inventario de Emisiones de NO <sub>x</sub> por combustión de fuentes fijas industriales. ....	67
2.3. Emisiones de NO <sub>2</sub> monitoreadas y reportadas para Bogotá en el año 2020.....	71
2.4 Emisiones de O <sub>3</sub> troposférico monitoreadas y reportadas para Bogotá en el año 2020. ....	77
2.5 Dinámica de la radiación solar y el NO <sub>2</sub> en el ciclo de formación del O <sub>3</sub> troposférico.....	79
3. Conclusiones.....	86
4. Recomendaciones .....	87
Referencias bibliográficas.....	89

Apéndices..... 97

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Composición promedio de los gases constantes de la atmósfera seca en % por volumen en el aire.....	20
Tabla 2. Contribución en % por volumen de los gases variables en la composición atmosférica total. ....	21
Tabla 3. Distribución de capas atmosféricas según la temperatura. ....	23
Tabla 4. Estados que pueden presentar las moléculas en los procesos fotoquímicos.....	31
Tabla 5. Óxidos de nitrógeno presentes en el aire .....	39
Tabla 6. Listado representativo de actividades antrópicas que emiten contaminantes a la atmósfera.....	51
Tabla 7. Inventario Consolidado de emisiones de las fuentes móviles y fijas para NO <sub>x</sub> y COV para la ciudad de Bogotá en el año 2018. ....	62
Tabla 8. Siglas asignadas por la RMCAB para cada estación de monitoreo operada en el año 2020.....	73

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Perfil de temperatura para cada capa que compone la atmósfera.....	23
Figura 2. Relación entre la intensidad de la irradiancia espectral y la longitud de onda.....	26
Figura 3. El espectro electromagnético.....	27
Figura 4. Balance energético Sol-Tierra. ....	29
Figura 5. Ciclos de interacción en la atmosfera de las fuentes generadoras de NO <sub>x</sub> y COV.....	46
Figura 6. Series temporales desestacionalizadas de medias móviles anuales de NO <sub>2</sub> , O <sub>3</sub> y HCHO estimados para el periodo 2009 a 2016 en la llanura del norte de China.....	48
Figura 7. Atmósfera y actividades contaminantes.....	52
Figura 8. Evolución de los contaminantes en la atmósfera.....	53
Figura 9. Proceso de transformación de los contaminantes en la atmósfera. ....	54
Figura 10. Mapa de Bogotá y sus localidades.....	58
Figura 11. Fuentes de emisiones identificadas para la ciudad de Bogotá.....	59
Figura 12. Distribución porcentual de las fuentes fijas identificadas para Bogotá al año 2018. ..	61
Figura 13. Participación en emisión de combustión de contaminantes criterio por categoría vehicular, año 2018.....	63
Figura 14. Distribución espacio temporal de emisiones de NO <sub>x</sub> (ton/año) para Fuentes Móviles en Bogotá. ....	64
Figura 15. Participación por localidad en las emisiones de fuentes móviles en carretera. ....	66
Figura 16. Distribución horaria para Fuentes Móviles 2018, según categoría vehicular para el contaminante NO <sub>x</sub> . ....	67
Figura 17. Participación por tipo de fuente en las emisiones de contaminantes criterio para el año 2018.....	68

Figura 18. Distribución espacio temporal de NO <sub>x</sub> para Fuentes fijas industriales en día hábil. ..	69
Figura 19. Perfil horario de las emisiones de NO <sub>x</sub> por combustión de las fuentes fijas industriales.....	71
Figura 20. Ubicación de las estaciones de monitoreo de contaminantes de la RMCAB – Año 2020.....	72
Figura 21. Concentraciones promedio anual de NO <sub>2</sub> – Año 2020.....	73
Figura 22. Concentraciones mensuales de NO <sub>2</sub> por estación – Año 2020.....	75
Figura 23. Imagen satelital del LandSat 8 mostrando la densidad de nube de distribución NO <sub>2</sub> troposférico a los 10 m.s.n.m. ....	76
Figura 24. Concentraciones promedio anual de O <sub>3</sub> – Año 2020.....	77
Figura 25. Concentraciones mensuales de O <sub>3</sub> por estación – Año 2020. ....	78
Figura 26. Comportamiento horario de las concentraciones de NO <sub>2</sub> – Año 2020.....	82
Figura 27. Comportamiento horario de las concentraciones de O <sub>3</sub> – Año 2020.....	83
Figura 28. Comportamiento del promedio mensual de la radiación detectada en Bogotá para el año 2020.....	84
Figura 29. Perfil horario de la Cantidad de radiación solar recibida en promedio día – Año 2020. ....	85

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Normatividad de calidad de aire en Colombia vs recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud.....	97
Apéndice B. Estaciones de monitoreo de la RMCAB y variables monitoreadas – Año 2020. ....	98

## Glosario

**Agente oxidante:** Compuesto químico que oxida a otra sustancia, es decir, que cede con facilidad oxígeno y acepta hidrógeno de otro compuesto. Se le denomina como agente oxidante ya que en una reacción química actúa como receptor de electrones.

**Atmósfera terrestre:** Cobertura gaseosa compuesta principalmente por nitrógeno (N<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>) molecular y pequeñas cantidades de otros gases como el vapor de agua (H<sub>2</sub>O) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

**Calidad del aire:** Hace referencia a la presencia en menor o mayor concentración cuando se cuantifican contaminantes en la atmósfera que puedan ser nocivos para la salud humana y todo el conjunto que conforma el medio ambiente. Se establecen índices de calidad del aire que proporcionan valores indicativos del estado de la atmósfera respecto a un contaminante en específico o a un conjunto de ellos.

**Compuesto orgánico volátil:** Compuesto orgánico que se caracteriza por presentar una presión de vapor menor a 0,01 kPa a 20°C.

**Contaminación atmosférica:** Presencia de sustancias en la atmósfera que en una determinada cantidad generan molestias y representan un riesgo para el bienestar de los seres vivos y la salud de las personas.

**Contaminante primario:** Es aquel que se transmite directamente a la atmósfera desde la fuente que lo genera.

**Contaminante secundario:** Es aquel que se forma en la atmósfera como resultado de reacciones químicas en las que interviene los contaminantes primarios. Las reacciones pueden ser hidrolíticas, oxidativas o fotoquímicas.

**Fuente móvil:** Es aquella fuente de emisión que por su uso es dispuesto para desplazamiento, por ejemplo, los automotores o vehículos de transporte de cualquier naturaleza.

**Inmisión:** es la transmisión de contaminantes atmosféricos desde la libre atmósfera a un receptor como el ser humano.

**Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>):** Grupo de compuestos químicos de tipo gaseoso formados por la combinación de oxígeno y nitrógeno, cuya formación se debe a la combustión a altas temperaturas.

**Ozono troposférico:** Es un gas incoloro e irritante generado por procesos reactivos de naturaleza fotoquímica entre los óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles y el oxígeno del aire a altas temperaturas en presencia de radiación solar.

**Radiación solar:** Es la energía emitida e irradiada por el Sol en todas las trayectorias a través del espacio por medio de ondas electromagnéticas.

**Reacción fotoquímica:** Reacción que se produce en la atmósfera como resultado de la formación de compuestos oxidantes cuando reaccionan simultáneamente los óxidos de nitrógeno, los hidrocarburos y el oxígeno en presencia de la radiación ultravioleta emitida por el Sol.

**Tropósfera:** Es la capa de la atmósfera más cercana a la superficie de la Tierra que comprende una altura promedio de hasta 12 km de altura (con una altura máxima de 19 km en latitudes ecuatoriales y una mínima de 9 km sobre los polos aproximadamente). En esta capa ocurren los

fenómenos meteorológicos más importantes ya que se agrupa el 80 % de toda la masa de la atmósfera.

## Resumen

**Título:** DINÁMICA DE LOS NO<sub>x</sub> COMO PRINCIPALES PRECURSORES FOTOQUÍMICOS DEL OZONO TROPOSFÉRICO EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ DURANTE EL AÑO 2020\*

**Autor:** GYNNA DANIELA MUNEVAR LEÓN\*\*

**Palabras Clave:** Contaminación atmosférica, Calidad del aire, Dióxido de nitrógeno, Ozono troposférico, Precursores fotoquímicos, Bogotá.

**Descripción:** El ozono (O<sub>3</sub>), es un gas invisible e incoloro, con capacidad corrosiva e irritante; cuya presencia es natural y necesaria en la estratosfera donde se desempeña favorablemente como un medio filtrante de la radiación ultravioleta. Sin embargo, se ha catalogado como un contaminante cuando se genera en la troposfera. Ha sido incluido dentro del grupo de contaminantes secundarios, ya que se forma a partir de la reacción fotoquímica de contaminantes primarios como los gases (óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles) en presencia de radiación solar. Estudios recientes, han confirmado que los contaminantes NO<sub>x</sub> en la forma de NO y NO<sub>2</sub> son emitidos en menor proporción al aire ambiente por fuentes naturales, en comparación con las emitidos por aquellas fuentes de actividades antrópicas.

El acelerado crecimiento urbano e industrial en las grandes ciudades como Bogotá, han sido factores altamente influyentes en la degradación del estado de la calidad del aire como resultado del constante uso de combustibles fósiles en actividades antrópicas como la operación de una buena parte del parque automotor de fuentes móviles; además de su alta utilización en el sector industrial.

En vista de la importancia que ha tomado el controlar y mitigar la afectación de la calidad del aire por la emisión de este tipo de contaminantes, que en altas concentraciones causan efectos desfavorables en los recursos naturales, el medio ambiente, y la salud humana; mediante el desarrollo de este documento se analizará que condiciones favorecieron los niveles más altos reportados en Bogotá durante el año 2020 como resultado de los monitoreos realizados para los NO<sub>x</sub> y ozono troposférico, con el fin de comprender la dinámica de los NO<sub>x</sub> en la forma de NO<sub>2</sub> como principal precursor en la generación de O<sub>3</sub> a nivel troposférico.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ciencias, Escuela de Química. Especialización en Química Ambiental. Leonardo Alfredo Pineda Pardo. MSc en Ciencias Ambientales.

### Abstract

**Title:** DYNAMICS OF NO<sub>x</sub> AS THE MAIN PHOTOCHEMICAL PRECURSORS OF TROPOSPHERIC OZONE IN THE CITY OF BOGOTÁ DURING THE YEAR 2020\*

**Author(s):** GYNNA DANIELA MUNEVAR LEÓN<sup>1</sup>

**Key Words:** Atmospheric contamination, Air quality, Nitrogen Dioxides, Tropospheric Ozone, Photochemical Precursors, Bogotá.

**Description:** Ozone (O<sub>3</sub>), is an invisible and colorless gas, with corrosive and irritant capacity; whose presence is natural and necessary in the stratosphere where it performs favorably as a filter medium for ultraviolet radiation. However, it has been classified as a pollutant when it is generated in the troposphere. It has been included in the group of secondary pollutants, since it is formed from the photochemical reaction of primary pollutants such as gases (nitrogen oxides and volatile organic compounds) in the presence of solar radiation. Recent studies have confirmed that NO<sub>x</sub> pollutants in the form of NO and NO<sub>2</sub> are emitted in a smaller proportion to the ambient air by natural sources, compared to those emitted by those sources of anthropic activities.

The accelerated urban and industrial growth in large cities such as Bogotá, have been highly influential factors in the degradation of the state of air quality as a result of the constant use of fossil fuels in anthropic activities such as the operation of a good part of the vehicle fleet of Bogotá. mobile sources; in addition to its high use in the industrial sector.

In view of the importance of controlling and mitigating the impact on air quality due to the emission of this type of pollutant, which in high concentrations causes unfavorable effects on natural resources, the environment, and human health; Through the development of this document, it will be analyzed what conditions favored the highest levels reported in Bogotá during the year 2020 as a result of the monitoring carried out for NO<sub>x</sub> and tropospheric ozone, in order to understand the dynamics of NO<sub>x</sub> in the form of NO<sub>2</sub> as the main precursor in the generation of O<sub>3</sub> at tropospheric level.

---

\* Degree Work

<sup>1</sup>Universidad Industrial de Santander. Faculty of Sciences, Faculty of Chemistry. Specialization in Environmental Chemistry. Leonardo Alfredo Pineda Pardo. MSc in Environmental Sciences.

## Introducción

En las últimas décadas a la calidad del aire se le ha dado prioridad, ya que hace parte de los principales problemas ambientales en las grandes ciudades de los países en vía de desarrollo (Tian et al., 2022a). La contaminación atmosférica es un problema sobre el cual se ha centrado un mayor interés en los tratados y normativas de índole nacional e internacional, por los efectos adversos que llevan a la existencia de escenarios peligrosos para el ser humano, el medio ambiente y todos los recursos naturales no renovables.

En los últimos años en nuestro país, los diferentes entes y autoridades ambientales han venido trabajando conjuntamente para hacer seguimiento y reportar datos confiables cuyo objetivo principal es el de evaluar el estado de la calidad del aire y así poder tomar acciones de control para prevenir y controlar su degradación por las emisiones de diferentes contaminantes atmosféricos de origen antrópico; ya que todo ciudadano tiene derecho a gozar de un aire limpio o en su defecto de estar expuesto a algunos contaminantes en niveles permisibles que no genere riesgo para su salud (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020).

Siendo Bogotá, la metrópolis de nuestro país cuyo crecimiento poblacional, urbanístico y económico le han permitido posicionarse como un referente para otras ciudades de Latinoamérica, también ha sido un foco de mucha atención en los últimos años en términos del estado de la calidad del aire en lo que refiere a las inmisiones de contaminantes primarios como los Óxidos de Nitrógeno NO y NO<sub>2</sub> (agentes oxidantes) y la generación de ozono troposférico, catalogándose este último como un contaminante secundario (Ibáñez Cornejo, *et al.*, 2013).

En la actualidad, los expertos siguen investigado con mayor interés sobre los contaminantes atmosféricos que degradan la calidad del aire ambiente en las grandes ciudades urbanizadas; ya

que la cantidad emitida a la atmósfera de dichos agentes oxidante en la forma de NO y NO<sub>2</sub> generados por fuentes naturales de procesos biogénicos como los incendios forestales, erupciones volcánicas y descomposición de nitratos orgánicos es menor en comparación con los aportados por actividades antrópicas.

Lo anterior, es el resultado del incremento de aquellas fuerzas impulsoras de la contaminación del recurso aire que como lo demuestran diferentes estudios en megaciudades de Asia como China (Yuan et al., 2021)., son: la urbanización, el incremento de consumo energético, extensión de actividades industriales que usan continuamente combustibles fósiles, actividades continuas de explotación minera y el transporte urbano. Todo lo anterior como causa del acelerado desarrollo económico de las ciudades altamente pobladas en la actualidad.

Bogotá es una ciudad urbanizada e industrializada, que cuenta con una extensión de área superficial de 1.775 Km<sup>2</sup>, además de tener una alta concentración poblacional de alrededor de 7,7 millones de habitantes al año 2018. Sumado a lo anterior, también se ha consolidado como una ciudad dinámica en el ámbito industrial y manufacturero (DANE, 2019) .

Dicho panorama, conlleva a pensar sobre la incidencia que pueda tener el alto consumo de combustibles fósiles por parte de los medios de transporte urbano y de las diferentes industrias, cuya quema genera la liberación de NO<sub>x</sub> especialmente de la especie NO<sub>2</sub>, agente oxidante que se comporta como principal precursor en la formación de O<sub>3</sub> troposférico.

En vista de que el O<sub>3</sub> troposférico es un contaminante corrosivo del aire y tóxico, cuya generación sigue siendo un problema que requiere nuestra atención colectiva; con este análisis se busca definir el cambio de la concentración de O<sub>3</sub> troposférico a partir de las emisiones de NO<sub>x</sub>

en la forma de NO<sub>2</sub> con base en los niveles monitoreados y reportados para las diferentes localidades de la ciudad por la red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá (RMCAB).

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Definir el cambio de las concentraciones de Ozono (O<sub>3</sub>) troposférico a partir de las emisiones de Nox como sus principales precursores fotoquímicos para la ciudad de Bogotá durante el año 2020.

### **1.2 Objetivos Específicos:**

Determinar las zonas locales con mayores emisiones de NO<sub>x</sub> a la calidad del aire en la forma de NO<sub>2</sub> para la ciudad de Bogotá durante el año 2020.

Identificar las zonas a nivel local de la ciudad de Bogotá donde se reportaron las mayores concentraciones de O<sub>3</sub> troposférico en el año 2020.

Interpretar la dinámica atmosférica de la radiación solar y el NO<sub>2</sub> como precursor fotoquímico en el ciclo de formación del O<sub>3</sub> troposférico.

## **2. Generalidades de la química atmosférica y sus contaminantes.**

### **2.1 Composición y estructura vertical de la atmósfera.**

En la atmósfera ocurren grandes cantidades de diversas reacciones químicas por la presencia de radiación electromagnética además de los fenómenos de transporte de los gases que la conforman; lo que la vuelve un escenario complejo para su estudio (Castro Salazar, 2021).

La atmósfera es la capa gaseosa más cercana a la superficie de la Tierra, cuya composición está dada por una mezcla de gases y aerosoles, estos últimos presentes en menor proporción. Las proporciones de los constituyentes que la componen han variado a lo largo de las eras geológicas, sin embargo, también se ha evidenciado su cambio en periodos más cortos, como el iniciado desde mediados del siglo XVII hasta la fecha por el auge de la revolución industrial. Esta capa tiene un espesor de 2000 km aproximadamente, donde en los 5 primeros km se concentra la mitad de su masa total; además de encontrarse las reservas de oxígeno y otros compuestos indispensables para la vida en la tierra (Spedding, 2017).

#### ***2.1.1 Composición química de la atmósfera.***

El aire que compone la atmósfera está formado principalmente por una mezcla de gases como el nitrógeno (N<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>) molecular, que en términos de aire seco tienden a tener proporciones relativamente constantes, llegando a constituir el 99,96% del aire seco. Las cantidades relativas de los gases constantes no varían hasta una altura promedio de 80 Km, manteniéndose en una proporción casi fija en la atmósfera. Dentro de este grupo de gases constantes también hay presencia de otras cantidades menores de gases inertes como el Argón (Ar), Neón (Ne), Helio (He), hidrógeno (H<sub>2</sub>) y Xenón (Xe) (Thompson, 1998).

Como se observa en la Tabla 1, los gases que se encuentran abundantemente en la atmósfera terrestre son el Nitrógeno (78,08%), el Oxígeno (20,95%) y el Argón (0,93%) y en mínimas cantidades están presentes los gases inertes como el Neón (0,0018%), Helio (0,0005%), Hidrogeno (0,00006%) y Xenón (0,00009).

**Tabla 1.**

*Composición promedio de los gases constantes de la atmósfera seca en % por volumen en el aire.*

<b>Gases constantes</b>	<b>Símbolo</b>	<b>% por volumen en el aire</b>
<b>Nitrógeno</b>	N <sub>2</sub>	78,08
<b>Oxígeno</b>	O <sub>2</sub>	20,95
<b>Argón</b>	Ar	0,93
<b>Neón</b>	Ne	0,0018
<b>Helio</b>	He	0,0005
<b>Hidrógeno</b>	H	0,00006
<b>Xenón</b>	Xe	0,00009

*Nota.* Adaptada de (Thompson, 1998).

Con base en los porcentajes mencionados en la tabla anterior, los científicos estiman que en la atmósfera existe un balance entre la destrucción (salida) y producción (entrada) de los gases más abundantes: el Nitrógeno y el Oxígeno. Por ejemplo, el N<sub>2</sub> es removido de la atmósfera a causa de procesos biogénicos en los que intervienen las bacterias de los suelos, y se incorpora a esta como resultado de la degradación de la materia orgánica por actividad de los microorganismos. Por su parte, el Oxígeno se remueve de la atmósfera principalmente por procesos de oxidación al combinarse con otras sustancias, además de ser consumido en la

respiración de los seres vivos liberándose dióxido de carbono; gas que se incorpora a la atmósfera como resultado de la fotosíntesis de las plantas (Thompson, 1998).

Por otra parte, los gases variables son los que no tienen cambios relevantes en su % de concentración presente en el aire. Pertenecen a este grupo el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), que se encuentra en una mayor proporción (0,036%) respecto al vapor de agua (H<sub>2</sub>O) que presenta cambios espacio temporales. Gases que también son importantes en los diversos fenómenos atmosféricos y los cuales están en una menor proporción son el metano (CH<sub>4</sub>), los Óxidos de Nitrógeno (NO y NO<sub>2</sub>), y el ozono (O<sub>3</sub>). (ver Tabla 2).

**Tabla 2.**

*Contribución en % por volumen de los gases variables en la composición atmosférica total.*

<b>Gases Variables</b>	<b>Símbolo</b>	<b>% por volumen en el aire</b>
<b>Vapor de agua</b>	H <sub>2</sub> O	0 a 4
<b>Dióxido de carbono</b>	CO <sub>2</sub>	0,036
<b>Metano</b>	CH <sub>4</sub>	0,00017
<b>Óxidos de Nitrógeno (Nox)</b>	NO, NO <sub>2</sub>	0,00003
<b>Ozono</b>	O <sub>3</sub> Troposférico Estratosférico	0,000004
<b>Clorofluorocarbonos</b>	CFC	0,0000001

*Nota.* Adaptada de (Thompson, 1998).

Si bien la atmósfera cuenta con un espesor considerable de cientos de kilómetros, cerca del 99% de su masa gaseosa llega a concentrarse en los primeros 30 Km desde la superficie terrestre y su composición llega a tener cambios en su concentración en función de la altura, por

lo que las partículas en estado líquido y sólido quedan suspendidas en la baja atmósfera; mientras que los porcentajes indicados en las tablas 1 y 2, pueden llegar a mantenerse hasta los primeros 80 a 100 Km de altura (Mediavilla Perez, 2005).

Debido a los fenómenos de transporte de partículas por acción del viento, a la atmósfera se incorporan impurezas emitidas de fuentes naturales, como por ejemplo, las partículas sólidas del polvo, sal marina y suelo cuyo papel es importante al permitir que en sus áreas de contacto superficiales se favorezca la condensación del agua para generar gotas de nubes. En cambio, las partículas que se introducen a la atmósfera por actividades humanas representan un riesgo para el equilibrio y la dinámica del sistema Tierra-atmósfera, ya que tienen una acción contaminante y por ende degradan la calidad del aire (Camilloni, 2007).

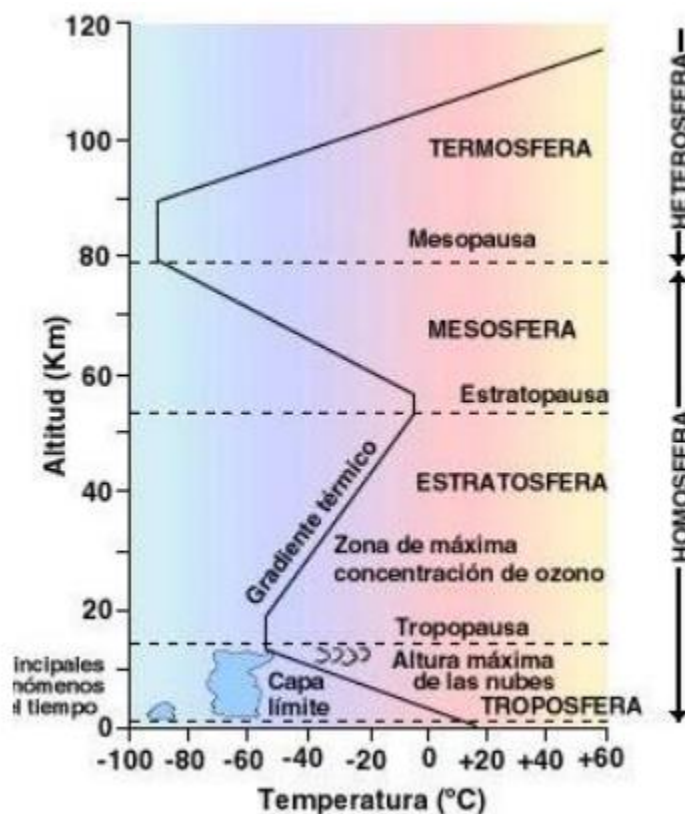
La atmósfera está estructurada en capas cuya composición y propiedades físicas varían por efecto de los procesos biológicos y geoquímicos, la radiación del Sol o las fuerzas gravitatorias de atracción de la Tierra. Para el caso de la radiación solar, esta interactúa con las moléculas que encuentra a medida que penetra la atmósfera. En la atmósfera superior, las variaciones más notables se generan en las zonas donde la radiación es muy activa como para favorecer la descomposición de las moléculas en sus unidades más elementales como átomos e iones que simultáneamente reaccionan entre sí originando otros productos (Gallego Pico, 2013).

### ***1.1.2 Estructura de la atmósfera y su perfil de temperatura.***

En vista de los cambios notables de presión y temperatura en la atmósfera; la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica estableció la estructura térmica de la atmósfera en función de su ascenso desde el suelo terrestre en las siguientes capas: troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera (Figura 1).

**Figura 1.**

*Perfil de temperatura para cada capa que compone la atmósfera.*



*Nota.* El gráfico representa las capas de la atmósfera terrestre en función del perfil de temperatura (°C). Tomado de Alley R, (2010).

La actividad química de los constituyentes y contaminantes presentes en cada capa, le otorgan propiedades diferenciables siendo las de mayor importancia las que definen a la troposfera, ya que esta contiene el aire respirado por el ser humano y en las que se desencadenan los procesos meteorológicos para el planeta (Spedding, 2017).

En la Tabla 3, se describen las características más importantes de cada capa atmosférica.

**Tabla 3.**

*Distribución de capas atmosféricas según la temperatura.***Distribución de Capas atmosféricas según la temperatura**

<b>Tropósfera</b>	Su espesor de altitud es de aproximadamente 12 Km. Se caracteriza porque su temperatura regularmente desciende a una tasa de 6,6 °C por Km, la cual tiene también una variación horizontal entre las diferentes zonas del planeta. En esta capa se producen los procesos meteorológicos necesarios como las precipitaciones. Dentro de esta capa, se ha denominado como tropopausa a la zona donde se presenta el gradiente negativo de temperatura.
<b>Estratósfera</b>	Capa de la atmósfera estimada a una altura entre los 12 y 50 Km. Se ha denominado así porque se presentan movimientos horizontales entre las capas de aire (o estratos), cuyo intercambio de gases entre las mismas es relativamente bajo. Tiene propiedades físicas semejantes a las de la troposfera; sin embargo, su gradiente de temperatura es inverso hasta llegar alcanzar los 0°C a medida que aumenta en altura. Contiene baja presencia de vapor de agua, razón por la que en esta capa no se forman las precipitaciones.
<b>Mesósfera</b>	Esta capa llega a extenderse hasta los 90 Km cuyo gradiente de temperatura disminuye con la altura, llegando a - 70° C en la zona llamada como mesopausa. Teniendo en cuenta la presencia del gas ozono en esta capa, los investigadores asocian el aumento en su temperatura con la absorción de radiación de la región ultravioleta e infrarroja proveniente del sol. En vista del rápido decrecimiento en la concentración de ozono respecto a la altura, es probable que el descenso de temperatura en la mesosfera esté vinculado a la reducción de la absorción de radiación solar por parte del O <sub>3</sub> .
<b>Termósfera</b>	Capa más alta de la atmósfera reconocida hasta hoy, a la cual también se le denomina como ionósfera. Se caracteriza porque presenta un aumento regular de la temperatura respecto a la altura. Por ejemplo, a los 200 km llega a sobrepasar los 500°C, mientras que en el límite superior de una altura de 700 a 800 Km los 1000°C. Lo anterior, se asocia con la absorción de la radiación ultravioleta del sol por parte del oxígeno y nitrógeno presentes en esta capa. El aire de la termósfera por acción de la radiación solar produce iones que se ubican dentro de las subcapas, permitiendo así la reflexión de las ondas radiales.

*Nota.* Adaptada de (Spedding, 2017).

### ***1.1.3 La troposfera.***

La tropósfera es la capa más cercana a la superficie Terrestre y por la cual se desencadenan los procesos de orden vital para la subsistencia de la vida animal y de todo ser vivo. El espesor promedio para esta capa es de aproximadamente 12 a 15 Km de altitud; no obstante dicha cifra puede variar en función de la latitud siendo mínima en el área polar y máxima en el ecuador. Aunque es la capa con menor espesor de todas las mencionadas, en ella se evidencian todos los fenómenos meteorológicos que precisan el clima en las diferentes zonas del planeta.

La temperatura en la tropósfera decrece con el incremento en la altitud a razón de 6,6 °C por Km, que horizontalmente también varía de unas zonas a otras. Por tales variaciones de temperatura, el aire en esta capa se mantiene en permanente agitación ya que tienen lugar movimientos verticales y horizontales de masas de aire que conducen a constantes perturbaciones que generan escenarios turbulentos reflejados en los fenómenos meteorológicos. A esos fenómenos de transporte de las masas de aire, se les asocia el traslado de contaminantes desde sus fuentes de emisión hasta lugares muy distantes, además de permitir su dilución (Gallego Pico, 2013).

Por debajo de la estratosfera encontramos la tropopausa, una zona intermedia muy fría y bastante estrecha, que por la parte inferior limita con la troposfera. A esta capa sólo llegan las radiaciones menos energéticas: algo de ultravioleta (parte del UVB y casi todo el UVA) y

prácticamente todo el visible y el infrarrojo, tanto solar como terrestre. De ellas, sólo el infrarrojo provocará un calentamiento apreciable en la baja troposfera (Mediavilla Perez, 2005).

#### ***1.1.4 Radiación solar y procesos fotoquímicos en la troposfera.***

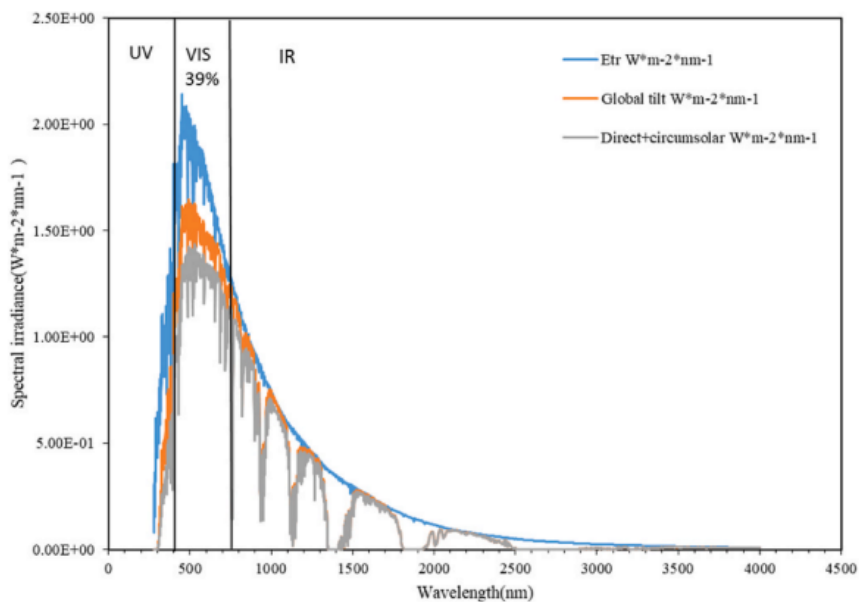
La fuente principal de energía que favorece a todos los procesos para la existencia de la vida y desarrollo de fenómenos en la atmósfera, la superficie terrestre y áreas oceánicas, proviene del sol. Al suelo terrestre, no llega toda la radiación solar que entra a la atmósfera. A causa del fenómeno físico de reflexión, aproximadamente un 30% de esta radiación se refleja en el espacio por la presencia de nubes; mientras que un 20%, es absorbida por moléculas de gases y partículas suspendidas en el aire (Chen, 2011).

Al traspasar las diferentes capas que componen la atmósfera, la radiación solar presenta una extenuación energética por causa de la dispersión que se genera al entrar ésta en contacto con los aerosoles contenidos en el aire. Es por lo anterior, que la radiación solar reflejada o absorbida por el área superficial de los continentes y océanos de la Tierra es menor a la máxima que pueda tener la atmósfera (Chen, 2011).

También se le ha denominado a la radiación solar como radiación no ionizante, conformada por la radiación ultravioleta (UV), visible (VIS) e Infrarroja (IR) según la longitud de onda que tiene en el espectro solar. El espectro VIS ocupa un rango pequeño dentro del espectro solar, sin embargo, contiene alrededor del 39% del total de energía de esta radiación (Figura 2) (Ji et al., 2022).

#### **Figura 2.**

*Relación entre la intensidad de la irradiancia espectral y la longitud de onda.*

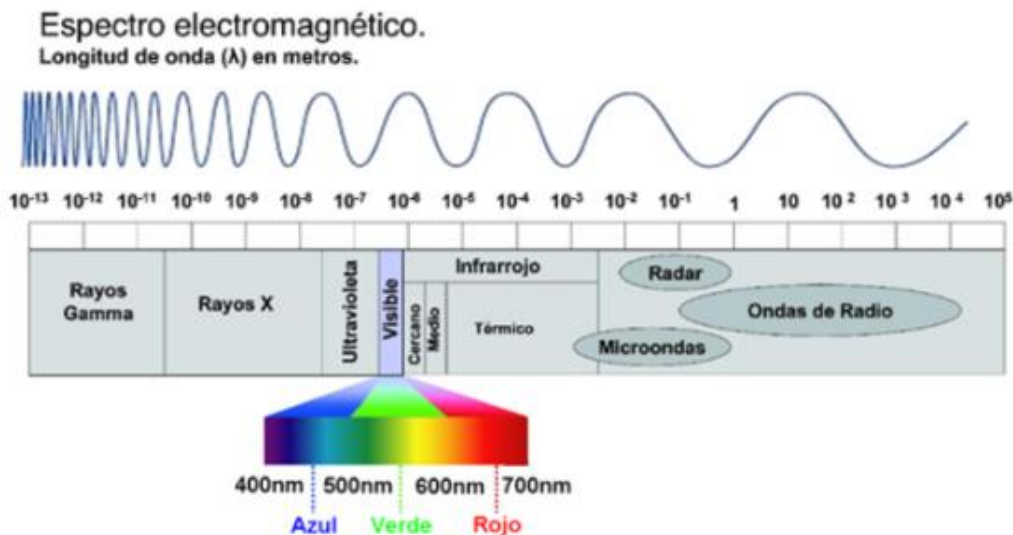


*Nota. La grafica representa la distribución de irradiancia espectral solar en función de la longitud de onda en las regiones UV, VIS e IR., donde Etr (Energía total de radiación, en  $W*m^{-2}*m^{-1}$ ). Tomado de (Ji et al., 2022).*

El máximo de la emisión solar está centrado, aproximadamente, entre los 400 y 900 nanómetros, lo que implica que la mayor parte de la radiación solar se concentra en el espectro visible e infrarrojo (Figura 3). Así, algo más del 50% corresponde al infrarrojo, mientras que alrededor de un 40% es luz visible; estas radiaciones son relativamente poco energéticas y no resultan perjudiciales para la vida. Pero la radiación que llega a la cima de la atmósfera contiene también una pequeña proporción, alrededor de un 9 % de radiación ultravioleta (UV), y cantidades mucho menores de rayos X y rayos gamma ( $\gamma$ ), cuya elevada energía puede destruir nuestras moléculas (Mediavilla Perez, 2005).

**Figura 3.**

*El espectro electromagnético.*



*Nota.* Tomada de la URL <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/caracteristicas-de-la-radiacion-solar> (2022).

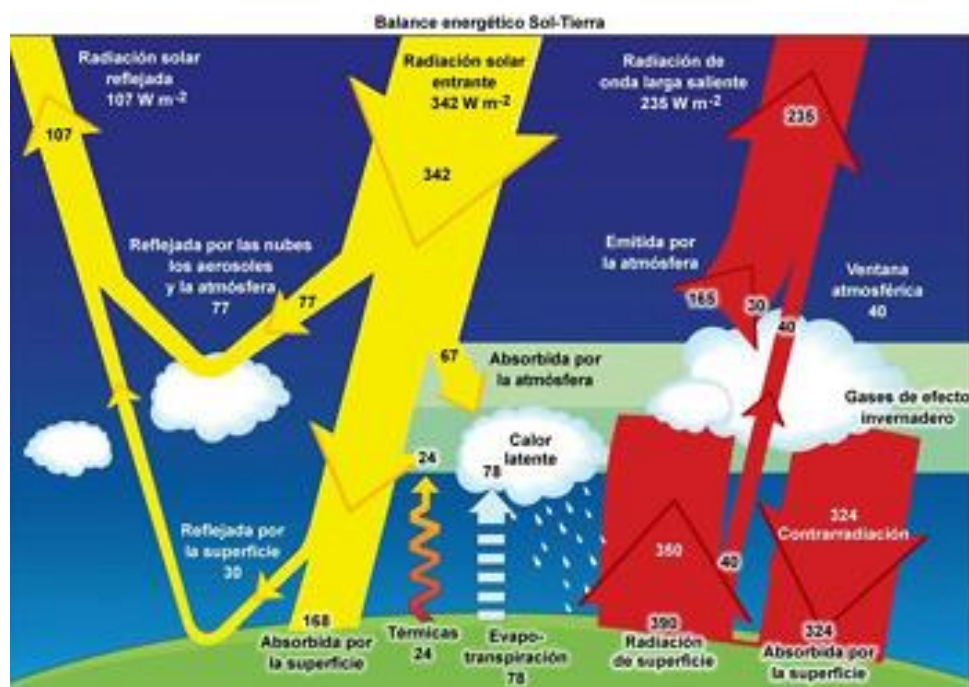
Cuando la radiación solar ingresa a la atmósfera terrestre, una parte es absorbida por la superficie terrestre para luego ser enviada en forma de radiación infrarroja (IR). Parte de esa fracción de radiación solar e infrarrojo, pueden ser absorbidas por los constituyentes atmosféricos reflejándose en un aumento de la temperatura del planeta. De la misma manera, parte de la radiación solar es reflejada y por ende retornada al espacio al interactuar con las nubes, partículas de aerosol contenidas en la atmósfera como por el contacto presentado con la superficie terrestre lo que permite el enfriamiento de la Tierra (Andino-Enríquez et al., 2018).

A pesar de que la absorción de radiación de alta energía provoca un cambio drástico tanto en la temperatura como en la composición química de la alta atmósfera, la cantidad de radiación que es retenida desde el exterior hasta la base de la estratosfera constituye únicamente el 3% de la radiación solar que llega a la cima de la atmósfera. El 97% se interna en la troposfera

y sólo el 50% del total consigue llegar a la superficie del planeta (Figura 4) (Mediavilla Perez, 2005).

#### Figura 4.

*Balance energético Sol-Tierra.*



*Nota.* Esquema de la distribución de la radiación en el sistema Tierra – Atmósfera. Fuente: MeteoGlosario Visual de AEMET, 2018)

La radiación que alcanza la troposfera corresponde mayoritariamente a luz visible e infrarroja, aunque también contiene algo del ultravioleta de menor energía que no es absorbido por el ozono estratosférico. Ese ultravioleta es capaz de inducir cambios de estado y algunas reacciones fotoquímicas y de disociación sobre los óxidos de nitrógeno y algunos otros compuestos minoritarios, ya que dicha energía se transfiere a las moléculas, átomos o iones que la absorbieron. Como consecuencia se genera una alteración de las moléculas ( $A_2$ ) y los

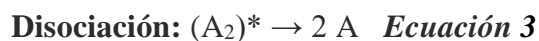
átomos (A) del aire provocando especies excitadas (A<sub>2</sub>)<sup>\*</sup> y (A)<sup>\*</sup> (Ecuación 1), que son moléculas o átomos con exceso de energía (Mediavilla Perez, 2005).



El tiempo de vida y el tipo de transformación que sufren las especies excitadas depende de su naturaleza y del exceso de energía que poseen: si es baja la cantidad de energía absorbida, la molécula aumenta un poco su temperatura y acaba por remitir el exceso de calor (Ecuación 2), que en nuestra atmósfera, conlleva a un calentamiento de la zona de absorción.



En cambio, cuando la radiación absorbida es muy energética, no sólo se produce calentamiento, sino que además la especie se descompone generando nuevos compuestos. En la alta atmósfera, la absorción de radiaciones muy energéticas, como los rayos gamma ( $\gamma$ ), los rayos X y los ultravioleta (UV), puede provocar la ruptura de las moléculas, que conduce a la formación de átomos (disociación, Ecuación 3) y la pérdida de electrones (e<sup>-</sup>) de átomos y moléculas (ionización, Ecuación 4).



El poco ultravioleta que consigue penetrar a través de la capa de ozono aún puede ser frenado por los aerosoles y las nubes, o absorbido por el ozono troposférico y por otros componentes minoritarios de la troposfera, tales como los óxidos de nitrógeno.

**1.1.4.1 Reacciones fotoquímicas o de fotodisociación.** La radiación electromagnética cuenta con la capacidad de transformar el estado normal energético rotacional, vibracional, vibracional-

rotacional, traslacional y electrónico de una molécula para llevarla a un estado alterado. Por ejemplo, la luz visible y la luz UV suelen generar transiciones electrónicas del estado basal a estados excitados de las moléculas. Una vez que la especie absorbente (D) está en un estado excitado (D\*), puede experimentar una variedad de procesos fotoquímicos como los descritos en la Tabla 4 (Ibáñez Cornejo, et al., 2013).

**Tabla 4.**

*Estados que pueden presentar las moléculas en los procesos fotoquímicos.*

<b>Proceso fotoquímico</b>	<b>Descripción</b>
Fluorescencia	Emitir luz y regresar al estado basal. $D^* \rightarrow D + h\nu$
Conversión interna	Este proceso no involucra a la radiación, ya que la molécula regresa al estado basal por la pérdida de energía extra que tenía en su estado excitado a causa de las interacciones con el medio.
Desactivación por colisión y fotosensibilización	Se presenta cuando la molécula regresa a su estado basal cuando colisiona con una molécula receptora A. La energía electrónica la puede liberar como energía cinética en el medio que la rodea, o bien la molécula que colisiona puede excitarse, participando en una reacción posterior. $D + h\nu \rightarrow D^*$ $D^* \rightarrow D + \text{energía}$ $D^* + A \rightarrow D + A^*$ $A^* \rightarrow \text{productos}$
Fotólisis	Separarse o reaccionar para formar nuevos productos: $D^* \rightarrow \text{productos}$

*Nota.* Adaptado de *Química Ambiental*. Mac Graw Hill, 2013, p. 83.

En concordancia con la Tabla 4, la fotodisociación (disociación por absorción de luz) ocurre cuando las moléculas (A<sub>2</sub>) del aire absorben radiación energética, esta se excita y se separan en sus átomos constituyentes.



Para este tipo de reacciones, se requiere como mínimo luz ultravioleta. Se producen principalmente desde la cima de la atmosfera hasta la estratosfera, afectando a todas las moléculas del aire superior. Por debajo de los 20 kilómetros de altura también se dan algunas reacciones de fotodisociación que están propiciadas por el ultravioleta menos energético que ha conseguido atravesar la barrera atmosférica; pero en la troposfera la disociación afecta sólo a algunos componentes minoritarios tales como los óxidos de nitrógeno. Estas reacciones influyen notablemente en la calidad del aire que respiramos y forman parte de las transformaciones que provocan las nieblas fotoquímicas en los ambientes muy contaminados (Gallego Pico, 2013).

## 1.2 Contaminación y contaminantes atmosféricos.

Como consecuencia de diversas actividades humanas o de los procesos biogénicos de la naturaleza, se generan compuestos cuya liberación, concentración y acumulación en el aire en un determinado tiempo, pueden provocar efectos adversos o molestias en el bienestar de las personas y otros seres vivos, como alteraciones en el medio ambiente. Este fenómeno, es lo que hoy en día se conoce como contaminación atmosférica o contaminación del aire.

Los contaminantes atmosféricos se han categorizado en 2 grupos principales: primarios y secundarios. Los primeros son aquellos que se incorporan en a la atmósfera tal y como fueron liberados: material particulado (PM), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO),

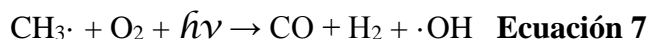
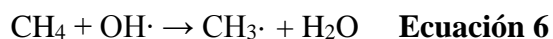
óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) y compuestos de la familia de los hidrocarburos.

Por otra parte, los contaminantes secundarios son los que han participado en diversas reacciones químicas, o bien, son el producto de reacciones desencadenadas en la atmósfera entre dos o más contaminantes primarios (ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>), ozono troposférico (O<sub>3</sub>), los compuestos orgánicos volátiles (COV's) y el smog fotoquímico (MANAHAN, 2007).

A continuación, se presenta una breve clasificación de los contaminantes atmosféricos de mayor interés:

### ***1.2.1 Monóxido de Carbono (CO) y Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>).***

El monóxido de carbono es una molécula diatómica conformada por la unión de un átomo de carbono con uno de oxígeno. Es un gas inodoro, incoloro y un poco más denso que el aire. Se libera a la atmósfera como producto de las combustiones incompletas, así como de las transformaciones fotoquímicas de otros gases orgánicos como el metano y compuestos orgánicos volátiles por acción de los radicales hidroxilo (OH·) presentes en la atmósfera. A su vez estos productos pueden reaccionar para formar CO<sub>2</sub> (Liu et al., 2018).

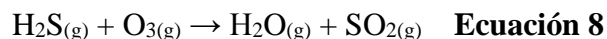


Su principal fuente de emisión está asociada a los gases de escape liberados en procesos de combustión de los vehículos. En este proceso se rompen los enlaces de las cadenas de carbón, combinándose con el oxígeno que permiten la generación de óxidos de carbono con dos o cuatro valencias. El dióxido de carbono hace parte de los productos de la combustión completa (CO<sub>2</sub>).

Este último es uno de los principales contaminantes que desde hace miles de años permite el efecto invernadero en el planeta (Rodríguez Santamaría, 2012).

### ***1.2.2 Dióxidos de azufre (SO<sub>x</sub>).***

Este grupo de contaminantes está formado por los gases SO<sub>2</sub> y SO<sub>3</sub> y el ion SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, los cuales se generan como resultado de la oxidación del azufre contenido en los combustibles, así como de la oxidación del H<sub>2</sub>S, siendo este último un gas tóxico proveniente de ciclos geotérmicos, la desintegración biológica de materia orgánica (reducción del sulfato) y procesos industriales como la obtención de pulpa de madera. La oxidación del H<sub>2</sub>S se desarrolla en la atmósfera con la presencia de oxidantes como el ozono (más agua en forma de vapor) (MAULDIN et al., 2012):



Por otra parte, por medio de reacciones fotoquímicas el SO<sub>2</sub> se oxida para producir SO<sub>3</sub>:



### ***1.2.3 Material particulado (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>).***

Este grupo de contaminantes generalmente provienen de las partículas contenidas en el polvo movilizado por acción del viento y los incendios forestales, procesos biogénicos como las erupciones volcánicas, combustión incompleta de combustibles fósiles, extracción y procesamiento de minerales, actividades industriales. Las partículas que se incorporan al aire ambiente, pueden ser cristales diminutos de sales del océano, partículas del suelo, compuestos metálicos, minerales, hidrocarburos condensados u otros compuestos orgánicos; así como aerosoles de ácido sulfúrico y nítrico. Tales partículas se clasifican generalmente como PM<sub>2,5</sub>

(partículas de diámetro  $2.5 \leq \mu\text{m}$ ) y PM<sub>10</sub> (partículas con  $2.5 \mu\text{m} \leq d \leq 10 \mu\text{m}$ ), siendo las primeras las más peligrosas para el ser humano y algunos animales en vista de que su sistema respiratorio no tiene la capacidad de eliminar estas partículas de su organismo y las cuales suelen estar formadas por aerosoles que contienen trazas de sustancias cancerígenas. Estas partículas tienen un papel determinante como núcleos de reacción para la formación de esmog u otras reacciones fotoquímicas (Ibáñez Cornejo, et al., 2013).

Aparte del material particulado PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> clasificados según su diámetro aerodinámico como partículas finas y ordinarias respectivamente; también se pueden encontrar las partículas ultrafinas que llegan a tener un tamaño  $<$  de  $1 \mu\text{m}$ , contaminantes que se derivan por la combustión de gasolina y diesel o de los productos de quemas agrícolas y forestales. Sin embargo, durante cortos periodos permanecen aisladas en la atmósfera ya por acciones aerodinámicas suelen unirse a partículas de mayor tamaño.

#### ***1.2.4 Oxidantes fotoquímicos.***

Son considerados contaminantes secundarios, formados por las reacciones fotoquímicas en las que participan contaminantes primarios. El O<sub>3</sub> es uno de los principales fotooxidantes que se genera naturalmente en los rayos o por las reacciones fotoquímicas en las que participa el NO<sub>2</sub> como precursor. Otros oxidantes fotoquímicos son el PAN (nitrato de peroxiacilo) y el PBN (nitrato de peroxibenzoilo), ambos producidos por medio de reacciones entre hidrocarburos, ozono y el radical OH· como derivados del NO en la atmósfera (Ibáñez Cornejo, et al., 2013).

En atmósferas urbanas, se ha llegado a considerar como oxidantes fotoquímicos a la suma de las proporciones de mezcla del NO<sub>2</sub> y O<sub>3</sub>, ya que las emisiones frescas de NO pueden reaccionar rápidamente con el ozono para formar el NO<sub>2</sub> (Herndon et al., 2008).

### ***1.2.5 Hidrocarburos aromáticos policíclicos – HAP.***

Son compuestos que se caracterizan por tener en su estructura como mínimo 3 anillos aromáticos. Se clasifican como “HAP pequeños” aquellos que contienen hasta seis anillos, mientras lo que contienen más de los 6 se les conoce como “HAP grandes”. Con base en su peso molecular, los HAP son gaseosos si este está por debajo de los 230 g/mol; mientras que para pesos moleculares por encima de dicho valor son partículas. Todos los HAP se han considerado como contaminantes nocivos del aire (por ejemplo, dibenzo(a)antraceno y pireno), y frecuentemente se generan como productos de la combustión incompleta de combustibles fósiles, emisiones de refinerías de petróleo y otras materias de origen vegetal. En la tropósfera, llega a tener una vida media de 3.5 a 10 días y pueden reaccionar con los radicales OH·, con el O<sub>3</sub> y los radicales nitros, siendo este último el responsable de la formación de compuestos altamente tóxicos como el nitro-HAP mutagénicos (Ibáñez Cornejo, et al., 2013).

Además de las sustancias mencionadas, se han encontrado otra serie de contaminantes que se emiten escasamente al aire, sin embargo, pueden causar efectos nocivos sobre poblaciones específicas y determinadas zonas donde su emisión es muy localizada. Dentro de este grupo de contaminantes, se han incluido a los halógenos y sus derivados, arsénico y sus derivados, material particulado de metales pesados y ligeros como el plomo, mercurio, cobre, zinc, partículas de sustancias minerales como los asbestos y sustancias radiactivas (Ibáñez Cornejo, et al., 2013).

### ***1.2.6 Contaminantes atmosféricos y Calidad del Aire en Colombia.***

Calidad del aire hace referencia al estado de la contaminación atmosférica y se emplea como un indicador para evaluar que tan contaminado se encuentra el aire y que tan aceptable es

para ser respirado. Las sustancias que atenúan la calidad del aire se caracterizan por tener diferentes composiciones y diversos orígenes, las cuales se han clasificado por los efectos que generan en la salud y en el medio ambiente como contaminantes: criterio, tóxicos o peligrosos, climáticos de vida corta y de efecto invernadero.

En vista de la diversidad de los contaminantes presentes en el aire ambiente, la organización mundial de la salud (OMS) a través de diversos estudios epidemiológicos, ha clasificado y denominado contaminantes criterio a aquellos que son perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos; y para los cuales se establecieron normas respecto a su concentración máxima permisible en la atmósfera. Dentro de este grupo están el material particulado menor de 10 y 2,5  $\mu\text{m}$  de diámetro (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>), el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) y el ozono troposférico (O<sub>3</sub>)<sup>2</sup>.

Actualmente, en nuestro país rige la Resolución 2254 del 01 de noviembre de 2017 *“Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones”*, en la cual como referente internacional considera los valores Guía de Calidad del Aire de la Organización Mundial de la Salud – OMS (2005).

En la mencionada resolución, se establecen los niveles de inmisión para el NO<sub>2</sub> con una media anual de 60  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y una media a 1 hora de 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; siendo estos los niveles más bajos para los cuales se ha demostrado con más del 95% de confianza, que la respuesta a la exposición prolongada a este contaminante disminuye en el ser humano la resistencia a las afecciones respiratorias como la neumonía y bronquitis. Para el caso del ozono troposférico (O<sub>3</sub>), 100  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

---

<sup>2</sup> Organización Mundial de la Salud. Guías de Calidad del Aire relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Actualización mundial, 2005.

para una media de ocho horas; es el nivel más bajo en el cual se presenta disminución de la función pulmonar, la inflamación de las vías respiratorias y mortalidades asociadas (IDEAM, 2021).

### **1.3 Óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>).**

Esta nomenclatura se refiere a una familia de contaminantes atmosféricos, cuyas diversas formas moleculares pueden estar presentes simultáneamente en la atmosfera de forma gaseosa o particulada. En forma gaseosa, los compuestos más importantes son el óxido nítrico (NO), el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), mientras que los nitratos constituyen la forma particulada (Hanif et al., 2020).

Los NO<sub>x</sub> suelen provenir de fuentes naturales a causa de la desintegración de la materia orgánica, en las descargas generadas durante las tormentas eléctricas, en los incendios forestales; mientras que los originados por fuentes antropogénicas provienen principalmente de actividades en donde se emplean combustibles fósiles; siendo los vehículos automotores las fuentes móviles de emisión más importantes. Por otra parte, las centrales eléctricas y las combustiones industriales son las principales fuentes fijas de emisión (Obolkin et al., 2021).

Entre los compuestos de nitrógeno detectados en el aire que respiramos, encontramos al menos, siete óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Aparte de los que se forman de manera natural durante la descomposición de la materia biológica o por las emisiones generadas en los incendios, una mayor parte de ellos son de origen antropogénico y, nuevamente, se generan en la combustión: la quema a temperaturas muy elevadas en una atmósfera rica de nitrógeno y oxígeno, conlleva a que ambos elementos se combinen para dar los óxidos de nitrógeno. Otros aportes de nitrógeno contaminante provienen de las fábricas de explosivos, abonos nitrogenados, etc (Mediavilla Perez, 2005).

En la tabla 5, se describen los distintos estados de oxidación que forma el nitrógeno en la atmósfera, siendo el N<sub>2</sub>O, NO y NO<sub>2</sub> los más estables y por ende pueden encontrarse en concentraciones estimables en la atmósfera no contaminada. Los equilibrios concernientes al N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, se desplazan a favor de la disociación de dichos compuestos, a las temperaturas y presiones parciales de la atmósfera, haciéndolos inestables (Spedding, 2017).

**Tabla 5.**

*Óxidos de nitrógeno presentes en el aire*

Óxido	Fórmula	Estabilidad en la atmósfera
<b>Oxido de dinitrógeno</b>	N <sub>2</sub> O	Estable
<b>Óxido de nitrógeno</b>	NO	Estable
<b>Trióxido de dinitrógeno</b>	N <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Inestable N <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ↔ NO + NO <sub>2</sub>
<b>Dióxido de nitrógeno</b>	NO <sub>2</sub>	Estable
<b>Tetróxido de dinitrógeno</b>	N <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	Inestable N <sub>2</sub> O <sub>4</sub> ↔ 2NO <sub>2</sub>
<b>Pentóxido de dinitrógeno</b>	N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Inestable N <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ↔ N <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + O <sub>2</sub>
<b>Trióxido de nitrógeno</b>	NO <sub>3</sub>	Inestable (no aislado)

*Nota.* Adaptada de (Spedding, 2017)

Algunos óxidos de nitrógeno son bastante tóxicos y tienden a reducir la visibilidad por absorción de luz solar, por ejemplo, el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) provoca en el cielo una coloración parduzca; pero sus efectos más adversos provienen principalmente de las reacciones que son capaces de inducir. Por un lado, pueden reaccionar con el agua y el oxígeno atmosféricos dando lugar a ácido nítrico constituyente de la lluvia ácida; por otro, este grupo de compuestos, desempeñan un papel muy importante en la formación de la niebla fotoquímica que se forma

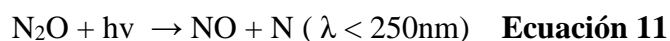
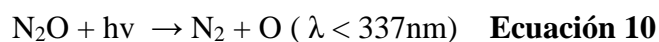
sobre las grandes ciudades urbanizadas. Esta niebla se forma mediante un proceso fotoquímico a partir de diversos gases contenidos en la troposfera.

La niebla fotoquímica es una bruma dañina, que reduce considerablemente la visibilidad y que se forma en ambientes urbanos muy contaminados, como consecuencia de la acción de la luz solar sobre los compuestos generados en la combustión del carbón y los derivados del petróleo (Mediavilla Perez, 2005).

El nitrógeno oxidado más abundante (NO<sub>2</sub>) en las capas bajas de la atmósfera, permanece estable en función de factores como la intensidad de la radiación solar, temperatura, emisión de contaminantes, tiempo transcurrido de dichas emisiones, etc.

### ***1.3.1 Óxido de dinitrógeno (Óxido Nitroso-N<sub>2</sub>O).***

Este compuesto fue identificado por primera vez en la atmósfera en 1939 al estudiarse su espectro en la región del infrarrojo, del que se cuantificó una concentración media de 0,25 mg/Kg (Spedding, 2017). Se mantiene en una concentración relativamente constante hasta la tropopausa, luego disminuyendo con la altura a causa de las siguientes reacciones de fotodisociación:



Este proceso de fotodisociación no transcurre únicamente en la troposfera, debido a que en esta capa se presenta una significativa interrupción del espectro de la radiación solar en la región ultravioleta específicamente a los 390 nm, provocada por la absorción de esta en la capa de ozono (Spedding, 2017). Por lo anterior, se ha considerado al suelo como principal fuente de

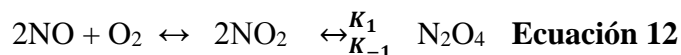
N<sub>2</sub>O, donde los microorganismos provocan la degradación del nitrógeno proteico hasta nitrógeno y N<sub>2</sub>O.

### 1.3.2 Óxido de nitrógeno (óxido nítrico – NO) y dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>).

La fuente de generación predominante en la formación de los óxidos de nitrógeno en el aire son los procesos de combustión. Con base en el proceso de formación química, los NO<sub>x</sub> son clasificados como térmicos, combustibles e instantáneos:

- **NO<sub>x</sub> térmicos:** es el producido a altas temperaturas (de alrededor de los 1200°C), siendo la combustión el mecanismo principal de generación debido a la oxidación del Nitrógeno diatómico (N<sub>2</sub>) contenido en el aire.
- **NO<sub>x</sub> combustibles:** es el producido a partir del Nitrógeno contenido en el combustible cuando reacciona con el exceso de oxígeno contenido en el aire. Teniendo en cuenta que el H<sub>2</sub> y el C presentes en el combustible se oxidan durante el proceso de combustión todos los átomos de N<sub>2</sub> son liberados como átomos inestables. Una parte es transformada a NO<sub>x</sub> y otra a nitrógeno molecular.
- **NO<sub>x</sub> instantáneos:** es el formado en la fase inicial del proceso de combustión. Se forman a partir de la reacción del nitrógeno atmosférico con radicales libres de hidrocarburos existentes en el aire.

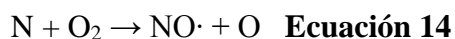
El monóxido de nitrógeno (NO) es oxidado a dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), según la reacción:



La tasa de reacción es muy dependiente de la concentración de NO, por lo que para valores altos de NO presentes principalmente en focos de emisión móviles y estacionarias, la

conversión a NO<sub>2</sub> es rápida; pero si los niveles de NO son bajos la tasa de reacción disminuye considerablemente (David Galán Madruga & Rosalía Fernández Patier, 2006).

La incorporación de cualquier otro compuesto que reaccione con el oxígeno atómico perturbará esta situación de pseudoequilibrio<sup>3</sup>, tal como ocurre en el caso de la niebla fotoquímica. Las principales fuentes de NO son la oxidación del NH<sub>3</sub> y los procesos de combustión a temperaturas elevadas, los cuales ocurren en la troposfera. Existen fuentes menos importantes en la estratosfera y termosfera, y en esta última se forma el NO por reacción del oxígeno con nitrógeno atómico (ecuaciones 13 y 14); siendo la última la reacción que permite la principal vía de eliminación de nitrógeno atómico en la atmósfera.

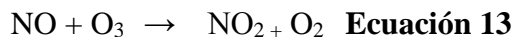


Tanto el NO como el NO<sub>2</sub> se encuentran en los gases de combustión, con predominio del primero ya que su formación se favorece a temperaturas elevadas. El NO se forma en los gases de la llama de combustión a expensas del nitrógeno y oxígeno del aire utilizado para quemar el combustible. Algunos expertos han llegado a concluir que la formación de NO por unidad de combustible quemado sigue el orden carbón > aceite > gas natural; ya que ésta es la secuencia de la temperatura media de combustión. En términos de la masa emitida, los vehículos de motor de combustión interna son la principal fuente de NO, ya que los procesos de combustión deben inducirse a temperaturas elevadas (Spedding, 2017).

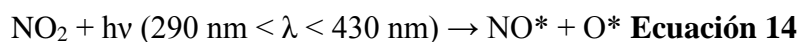
---

<sup>3</sup> Se entiende por pseudoequilibrio el estado de un sistema donde el equilibrio de sus reacciones cuenta con un grado de estabilidad pero que puede verse afectado por diversos factores como la presencia de otros compuestos.

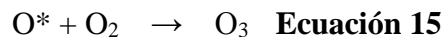
Bajo factores característicos de la tropósfera, la reacción anterior no es relevante, si se considera la reacción entre NO y ozono (O<sub>3</sub>) como la vía principal de producción de NO<sub>2</sub>:



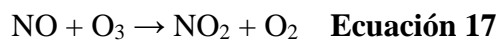
Durante las horas de luz diurnas, el NO<sub>2</sub> formado absorbe fuertemente energía en la región ultravioleta, teniendo así un proceso de transformación a NO y Oxígeno atómico, por efecto de la fotodisociación lo que también conlleva a la generación de O<sub>3</sub>:



La reacción (ecuación 15), consume la mayor parte del oxígeno atómico producido de modo que el resultado final conduce a concentraciones iguales de NO y O<sub>3</sub> a partir del NO<sub>2</sub> presente en la atmósfera. Ambos compuestos reaccionan a su vez entre sí (ecuación 17), completando de este modo un ciclo (Spedding, 2017).



Este proceso se presenta en la atmósfera de manera cíclica, ya que al final de la serie de reacciones indicadas anteriormente se genera el NO<sub>2</sub> inicial. Estas reacciones, se desencadenan cuando la intensidad de radiación solar es mayor durante el día, usándose como reactivo principal el NO<sub>2</sub> generado por las altas concentraciones emitidas en las horas de alto tráfico vehicular como de otras operaciones de combustión (Wang, Q. et al., 2017). Así se llega a una situación en que permanecen constantes las concentraciones de NO y NO<sub>2</sub>, controladas por la probabilidad de la siguiente reacción:



#### 1.4 Ozono troposférico (O<sub>3</sub>).

El ozono (O<sub>3</sub>) es un gas incoloro, con propiedades corrosivas e irritantes; componente imprescindible de la estratosfera. Cerca del 90% de este ozono estratosférico está entre los 10 y 50 km sobre la superficie terrestre (Meng et al., 2022) denominado “ozono bueno”; el cual se constituye como el filtro principal que evita la llegada directa de la radiación ultravioleta proveniente del Sol al planeta, porque de no ser así, lo anterior, podría reflejarse en el incremento de los casos de cáncer en la piel, casos de cataratas, deterioro del sistema inmunológico en los humanos y afectación de la base de la cadena alimenticia como el fitoplancton marino hasta la productividad de las cosechas.

Si bien, esta molécula juega un papel vital en las capas de mayor altitud de la atmósfera terrestre, en la troposfera se ha catalogado como un contaminante secundario, ya que su proceso de formación es resultado de la reacción entre contaminantes primarios como los óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles en presencia de la radiación solar. Este ozono que se encuentra cerca de la superficie, denominado como “ozono malo” por su efecto contaminante, presenta las mayores concentraciones entre la superficie terrestre y los 10 metros de altura y es llamado ozono superficial<sup>4</sup>.

Este contaminante secundario del aire es formado en la atmósfera a través de una compleja reacción fotoquímica (Azeez, L., Oyedeji, O.A., Adewuyi, S.O., et al, 2016). Es uno de los compuestos principales del smog fotoquímico, que al ser un oxidante fuerte juega un papel importante en la capacidad oxidativa de la atmósfera (Minga *et al.*, 2010). Es un contaminante

---

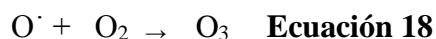
<sup>4</sup> DEAM–METEO/004-2010. *Análisis de variables en altura con base en los ozonosondeos realizados en Bogotá.* Marzo, 2010.

corrosivo del aire y tóxico, cuya contaminación sigue siendo un problema grave que requiere nuestra atención colectiva (Rozbicka, 2020).

La exposición al O<sub>3</sub> puede dañar la salud humana a través de enfermedades respiratorias y conducir a una disminución en la función pulmonar (Banan *et al.*, 2013). Las Naciones Unidas proyectaron que más de 600 millones de personas en áreas urbanas de todo el mundo están expuestas a contaminantes atmosféricos generados por el tráfico, incluidos precursores del ozono como algunos hidrocarburos y óxidos de Nitrógeno (NO y NO<sub>2</sub>).

En áreas urbanas los principales precursores en la formación del O<sub>3</sub> troposférico, son los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>, esto es, NO y NO<sub>2</sub>), los compuestos orgánicos volátiles (COV), el metano (CH<sub>4</sub>) y el monóxido de carbono (CO) (Meng *et al.*, 2022).

A diferencia de este contaminante, el ozono estratosférico se forma en las capas altas de la atmosfera a partir del oxígeno molecular en una altura mínima de 10 Km por acción de los rayos ultravioleta (UV) de onda corta que se disocia para generar oxígeno monoatómico (O<sup>·</sup>), que a su vez reacciona con oxígeno molecular (O<sub>2</sub>) produciendo este compuesto que forma una capa en la estratosfera con una concentración de varias partes por millón (Rodríguez Santamaría, 2012):



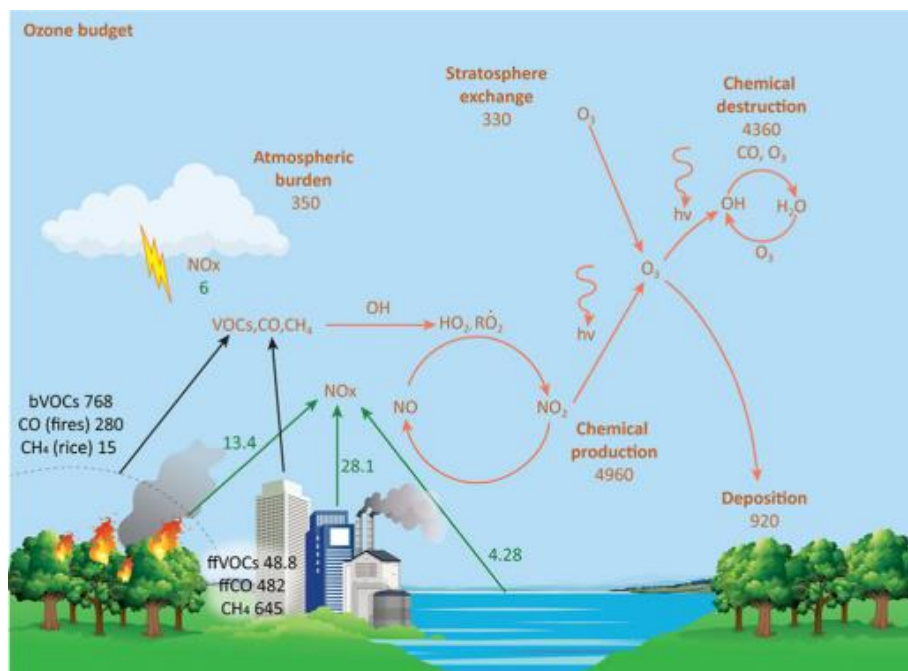
El ozono también se forma a través de reacciones que implican a la radiación solar, tanto en los bosques como en los ambientes muy polucionados, aumentando durante el verano en las horas de mayor insolación y disminuyendo durante el invierno. Pero la concentración de ozono en superficie suele ser muy baja y sus efectos adversos sólo se evidencian en lugares muy

contaminados, en donde favorece la formación de otros compuestos muy agresivos; como, por ejemplo, los peróxidos y los radicales de las nieblas fotoquímicas que son compuestos altamente nocivos para todos los seres vivos, ya que, entre otras cosas, provocan problemas sobre las mucosas y los pulmones, y el envejecimiento prematuro de las células (Mediavilla Perez, 2005).

En la Figura 5, se observa una adaptación de las fuentes generadoras de NO<sub>x</sub>, y COV y sus ciclos al interactuar con los radicales libres presentes en la atmósfera y por acción de la radiación solar.

### Figura 5.

*Ciclos de interacción en la atmósfera de las fuentes generadoras de NO<sub>x</sub> y COV.*



*Nota.* Presupuesto anual simplificado de ozono troposférico (O<sub>3</sub>). Producción global de O<sub>3</sub> y emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y fuentes de carbono reactivo de vegetación y fuentes industriales. Abreviaturas: bVOC, compuestos orgánicos volátiles biogénicos distintos del

metano; CH<sub>4</sub> (arroz), metano de los arrozales; CO (incendios), producción de monóxido de carbono a partir de la quema de biomasa; ffCO, monóxido de carbono de combustibles fósiles; ffVOC, compuestos orgánicos volátiles de combustibles fósiles. Adaptado de (Wedow et al., 2021).

Así las cosas, en los procesos fotoquímicos de la atmósfera participan radicales libres que se derivan de otros compuestos principales, por ejemplo, los radicales OH· (hidroxilo) que se forman a partir de la descomposición de la molécula de hidroperóxido (HO<sub>2</sub>) o a partir de la reacción del oxígeno atómico excitado por la molécula del agua. Es uno de los principales oxidantes diurnos en la troposfera ya que tiene la capacidad de eliminar la mayoría de los gases traza liberados a la troposfera, incluidos los gases de efecto invernadero y las sustancias nocivas para la salud, induciendo a la formación de varias especies, como el O<sub>3</sub> y otros compuestos orgánicos secundarios (Wang, G. et al., 2021).

Las concentraciones elevadas de ozono troposférico (O<sub>3</sub>) tienen un impacto adverso directo en la salud humana y del ecosistema en la superficie, mientras que en la troposfera libre el O<sub>3</sub> actúa como un gas de efecto invernadero e impulsa la producción del radical hidroxilo, que controla la vida química de muchos contaminantes atmosféricos y gases reactivos de efecto invernadero.

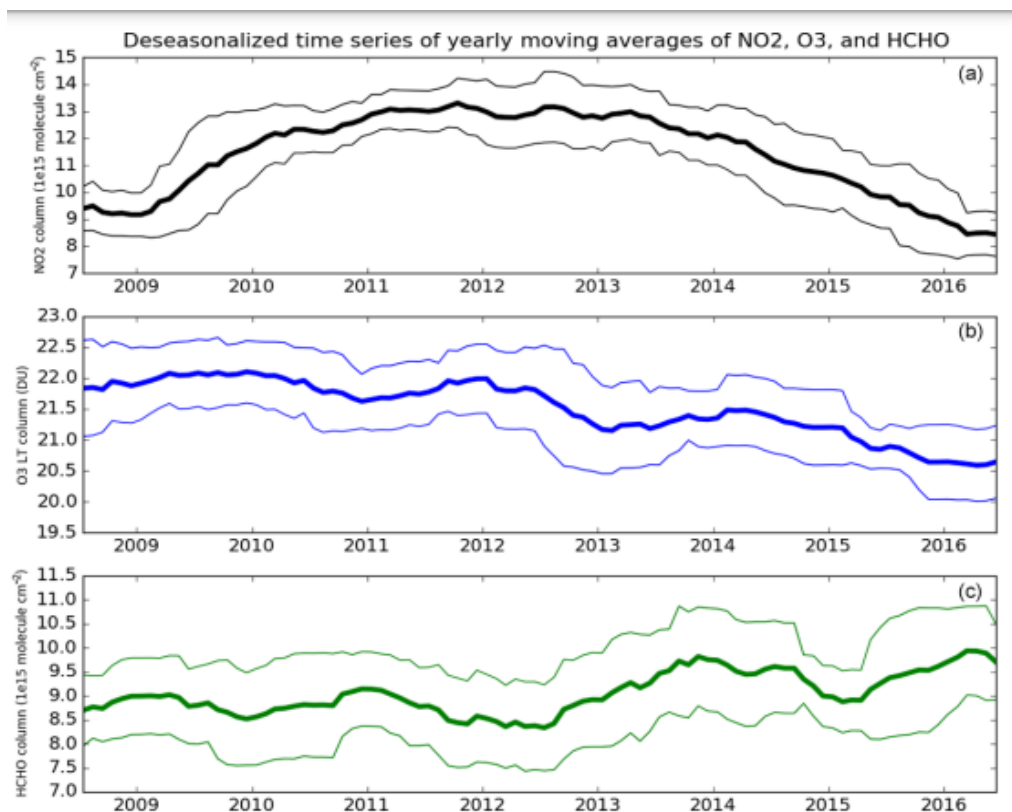
Diversos estudios han señalado no solo cambios en las emisiones de precursores de O<sub>3</sub>, sino también cambios tanto en la entrada neta de O<sub>3</sub> de la estratosfera como en los patrones de transporte a gran escala que contribuyen a las tendencias observadas y la variabilidad en el O<sub>3</sub> troposférico. Para muchas regiones fuera de Asia, las mediciones in situ sugieren que el O<sub>3</sub> troposférico se ha mantenido relativamente constante en la década de 2000 luego de aumentos sustanciales en las décadas de 1980 y 1990, al menos parcialmente debido a cambios en las

emisiones de precursores de O<sub>3</sub>, incluidos los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y los hidrocarburos. (Verstraeten et al., 2015).

Otros estudios han confirmado la correlación de la formación del O<sub>3</sub> troposférico con la presencia de sus principales precursores (Nox y COV's). Por ejemplo, en una región altamente contaminada como la llanura del norte de China se han puesto en marcha políticas para la reducción de emisiones durante los últimos 10 años, las cuales están vigentes desde 2006 para las emisiones de SO<sub>2</sub> y desde 2010 para las emisiones de NO<sub>x</sub>. Aunque las emisiones de NO<sub>x</sub> de China se redujeron en los últimos años, las emisiones de COV han aumentado o se han estancado. La reciente disminución observada del NO<sub>2</sub> troposférico podría haber contribuido principalmente a la disminución del ozono en los niveles por encima de la capa superficial, donde la producción de ozono es más sensible al NO<sub>x</sub> (Figura 7) (Dufour et al., 2018).

**Figura 6.**

*Series temporales desestacionalizadas de medias móviles anuales de NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y HCHO estimados para el periodo 2009 a 2016 en la llanura del norte de China.*



*Nota.* La grafica corresponde a la tendencia de medias móviles anuales de las series temporales desestacionalizadas de las columnas troposféricas para el NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y HCHO (Hidrocarburos) sobre la llanura central de China entre los años 2009 y 2016. Fuente: (Dufour et al., 2018)

La clase de reacciones más importante para la formación de ozono en la troposfera es la reacción de NO (Óxido Nítrico) con un radical peroxi (ROO-), que a su vez se forma durante la oxidación del carbón reactivo<sup>5</sup>. Durante este proceso, el NO se convierte en NO<sub>2</sub> (dióxido de nitrógeno), que se puede fotolizar rápidamente, formando finalmente ozono y NO. La eficiencia de la producción de ozono a partir de los NO<sub>x</sub> (concentración combinada de NO y NO<sub>2</sub>), varían significativamente dependiendo de la ubicación y el momento de las emisiones de NO<sub>x</sub>. En la capa límite contaminada, el NO<sub>x</sub> es rápidamente eliminado de la atmósfera a través de la

<sup>5</sup> Atkinson, R.: Atmospheric chemistry of VOCs and NO<sub>x</sub>, Atmos. Environ., 34, 2063–2101, 2000.

reacción de NO<sub>2</sub> con OH formando HNO<sub>3</sub>, que posteriormente se pierde mediante deposición seca o húmeda.

En condiciones menos contaminadas, la fotólisis de NO<sub>2</sub> compite más eficazmente con la producción de HNO<sub>3</sub>, lo que permite que cada unidad de NO<sub>x</sub> reaccione con un mayor número de radicales peroxi antes de finalmente ser eliminados por OH; lo que conduce a una mayor eficiencia de producción de ozono por unidad de NO<sub>x</sub>. Cuando el NO<sub>x</sub> se eleva libremente a la troposfera, su productividad de ozono aumenta sustancialmente (Jacob et al., 1999). Así, las emisiones de NO<sub>x</sub> en los trópicos son especialmente eficaces en la producción de ozono troposférico debido a el hecho de que se transportan a lo alto por convección profunda.

Aunque se han realizado varios esfuerzos para reducir la emisión de sus precursores, principalmente óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles (COV), los niveles de O<sub>3</sub> en el aire siguen siendo elevados en muchas regiones del mundo, y se prevé que aumenten aún más debido tanto las actividades antropogénicas como al cambio climático (Cotrozzi, 2021).

En lo relacionado a los efectos sobre la calidad del aire, en los últimos años se han venido realizando estudios en grupos focales de grandes ciudades urbanizadas, con el fin de encontrar la relación del incremento en enfermedades respiratorias y el aumento de los NO<sub>x</sub> y O<sub>3</sub> en el aire ambiente. Por ejemplo, el aumento de los niveles de ozono se asoció con una mayor incidencia de síntomas, pero los más fuertes en la mayoría de las asociaciones estadísticamente significativas se encontraron con la caracterización de la calidad del aire local. Específicamente, un aumento en el Índice de calidad del Aire local (AQI-local) en una categoría se asoció con un 34% mayores probabilidades de congestión nasal. Cuando las categorías de AQI fueron "Malo" y "Severo", se observó un aumento en la incidencia de tos (Stergiopoulou et al., 2018).

### 1.5 Fuentes de contaminación atmosférica en áreas urbanas.

La contaminación atmosférica causada por la actividad antropogénica ha estado presente desde hace 500 años. Datos históricos revelan que en diciembre de 1952, en la ciudad de Londres se presentó el primer caso grave por efectos de la contaminación donde los altos niveles de contaminantes se asociaron con el alarmante aumento en el número de las muertes (alrededor de 4000). Otras ciudades donde se han presentado altos niveles de contaminantes del aire son: México, Rio de Janeiro, Milán, Ankara, Melbourne, Búfalo, Tokio y Moscú, por nombrar algunas (Rosales Castillo, J. *et.al*, 2011).

La contribución de cada fuente a la contaminación local variará según el tipo y número de procesos industriales locales, la densidad y antigüedad del transporte por carretera y las condiciones climáticas locales.

En las grandes ciudades urbanizadas y con alta actividad industrial, las fuentes de emisión de los principales contaminantes atmosféricos pueden asociarse a las siguientes actividades antrópicas (Tabla 6) :

**Tabla 6.**

*Listado representativo de actividades antrópicas que emiten contaminantes a la atmósfera.*

Actividad	Principales contaminantes emitidos
Uso de vehículo automotor	Gases contaminantes y material particulado expulsados por los tubos de escape como el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ), hidrocarburos no quemados y compuestos de plomo a causa del uso del aditivo tetraetilo de plomo para aumentar índice de octano en la gasolina.

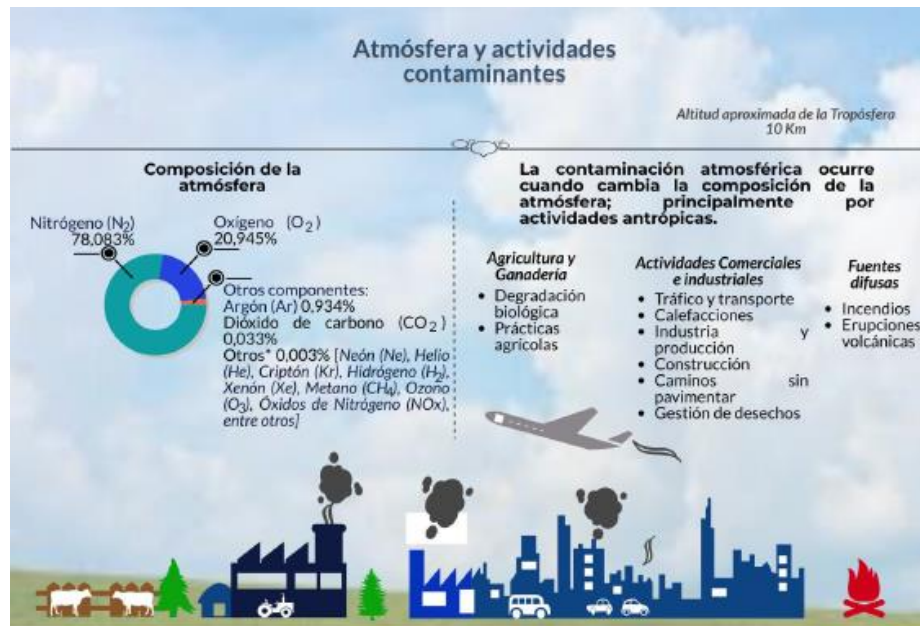
<b>Actividad</b>	<b>Principales contaminantes emitidos</b>
Calderas industriales para generación de energía eléctrica y calor	Usualmente los combustibles fósiles empleados para la generación de energía en forma de electricidad y de calor son el carbón y el combustóleo. Como parte del proceso de combustión se genera y por ende se libera a la atmósfera el azufre contenido en forma de dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> ) junto con otros contaminantes como lo óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ), dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ), metales pesados entre otros.
Procesos industriales y manufactureros	Estos contaminantes se caracterizan porque son producidos en concentraciones considerables en las distintas etapas de los procesos industriales y por la complejidad de los mismos. Los focos de emisión industrial suelen generar emisiones puntuales que pueden controlarse como emisiones difusas de difícil control. Entre los sectores que tienen mayor emisión de contaminantes a la atmosfera se destacan: siderurgia, refinerías de petróleo, industrias químicas, industrias básicas del aluminio y derivados del flúor cuyos aportes de contaminación es en material particulado, óxidos de nitrógeno (NO <sub>x</sub> ), dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ), óxidos de azufre (SO <sub>x</sub> ), amoníaco, entre otros.

*Nota.* Adaptada de (Rodríguez Santamaría, 2012)

En la figura 7, se identifican las actividades que son fuentes principales de los contaminantes atmosféricos más predominantes en la atmósfera:

### **Figura 7.**

*Atmósfera y actividades contaminantes.*

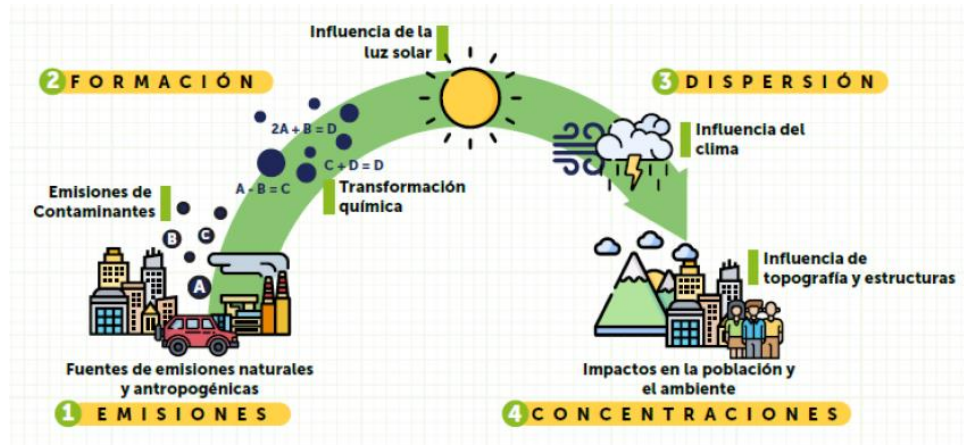


*Nota.* Tomada de (IDEAM, 2021). Informe del estado de la calidad del aire en Colombia año 2019, p. 17. El origen de estos contaminantes es diverso, pueden ser emitidos a la atmósfera a partir de fuentes naturales como erupciones volcánicas, incendios forestales, erosión del suelo, procesos de polinización, entre otros, que son propios de la dinámica terrestre. También existen emisiones por el desarrollo de actividades antropogénicas tales como los procesos de utilización de combustibles fósiles en la industria y en el transporte, el desarrollo de actividades mineras, el uso de fertilizantes y la quema de residuos al aire libre, entre otras.

### 1.6 Dinámica de la contaminación en la atmósfera.

Hoy en día, se ha englobado dentro de la dinámica de la contaminación atmosférica 4 fases de transformación por las que pasan las emisiones generadas por las fuentes contaminantes, como resultado de su interacción con la atmósfera (incluidos los distintos factores meteorológicos). Es así, como se permite comprender la directa afectación de los ecosistemas y población en general de una zona (Figura 8).

**Figura 8.**

*Evolución de los contaminantes en la atmósfera.*

Nota. El gráfico representa de forma general la transformación por etapas de los contaminantes emitidos a la atmósfera por las fuentes. Adaptado del informe de inventario de emisiones de contaminantes (Secretaría Distrital de Ambiente, 2020).

En la figura 9, se describen brevemente las etapas en este proceso de transformación:

**Figura 9.***Proceso de transformación de los contaminantes en la atmósfera.*

*Nota.* El gráfico resume las 4 etapas de transformación para los contaminantes atmosféricos. Adaptado del informe de inventario de emisiones de contaminantes (Secretaría Distrital de Ambiente, 2020).

### **1.7 Red de monitoreo de calidad del aire de Bogotá – RMCAB.**

En Colombia, en cabeza del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) y sus entidades adscritas como el IDEAM y autoridades ambientales, en materia de emisiones y calidad del aire se ha venido trabajando conjuntamente en el planteamiento de una normativa que como herramienta nacional permita un desarrollo gradual, donde la capacidad técnica, tecnológica y económica del país permitan proteger la salud humana y el medio ambiente; ya que estos son factores primordiales que llevan a un óptimo planteamiento normativo de carácter técnico. Además del desarrollo en políticas y normativas, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible trabaja con distintos ejes en la formulación de estrategias reguladas, eficientes y equitativas, enfocadas a prevenir y controlar la Contaminación del Aire en el territorio nacional.

Por el anterior argumento, el MADS, expidió la Resolución No. 2254 el 1 de noviembre de 2017, la cual establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión y adopta varias disposiciones para la gestión del recurso aire a nivel nacional, con el objeto de asegurar en lo posible un ambiente sano y así disminuir el riesgo que pueda causarse en la salud humana por la exposición a los contaminantes atmosféricos.

La Resolución 2254 de 2017 contempla las recomendaciones planteadas por la Organización Mundial de la Salud – OMS; quien estipuló un valor guía y diferentes niveles objetivo a partir de la evidencia obtenida por estudios epidemiológicos, (ver Apéndice A). Los

niveles allí referenciados, se han propuesto como pasos estratégicos para una reducción gradual y efectiva de la contaminación del aire en zonas donde la concentración de sustancias contaminantes excede los límites máximos permisibles.

Es por lo anterior que el Distrito Capital por medio de la Secretaria distrital de Ambiente cuenta con la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá – RMCAB, la cual monitorea y registra continuamente para diferentes lugares de la ciudad, información de las concentraciones de contaminantes como de las variables meteorológicas.

El proceso para el monitoreo de contaminantes, parte con la medición de los parámetros en cada estación de la red y el almacenamiento de todos los datos en un datalogger. Cada hora son actualizados los datos, para así ser transmitidos hacia el servidor central donde se almacena la información en una robusta base de datos. La trazabilidad de toda la información es verificada y validada desde su captura en los equipos hasta la revisión en la sede central, con el fin de obtener datos confiables para la elaboración de los informes periódicos de calidad del aire. En dichos reportes se evalúa el cumplimiento de los niveles máximos permisibles establecidos por la Resolución 2254 del 2017 del MADS. (Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, (RMCAB), 2021).

Durante el año 2020 la RMCAB alcanzó las dieciocho (18) estaciones de monitoreo de las cuales diecisiete (17) son fijas y una (1) es móvil. Las estaciones de la RMCAB se ubican en sitios estratégicos de la ciudad aplicando las buenas prácticas de ingeniería además de aplicar los requisitos para su diseño y operación como lo establece el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire en Colombia.

Las estaciones cuentan con equipos automáticos que permiten el monitoreo continuo de las concentraciones de contaminantes criterio: material particulado (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>), gases contaminantes (SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, O<sub>3</sub>), además de variables meteorológicas de Temperatura, humedad relativa, presión barométrica, precipitación, velocidad y dirección del viento y radiación solar.

## **2. Reporte del inventario de emisiones de Fuentes fijas y móviles a nivel local en la ciudad de Bogotá.**

Bogotá es una ciudad urbanizada e industrializada, que cuenta con una extensión de área superficial de 1.775 Km<sup>2</sup>, además de tener una alta concentración poblacional de alrededor de 7,7 millones de habitantes al año 2020. Sumado a lo anterior, también se ha consolidado como una ciudad dinámica en el ámbito industrial y manufacturero (DANE, 2019) .

Ubicada en el Centro del país en la cordillera oriental, la capital de Colombia tiene una extensión aproximada de 33 kilómetros de sur a norte y 16 kilómetros de oriente a occidente y se encuentra situada en las siguientes coordenadas: latitud Norte: 4°35'56" y longitud Oeste de Greenwich: 74°04'51". Está dentro de la zona de confluencia intertropical, produciendo dos épocas de lluvia; en la primera mitad del año en los meses de marzo, abril y mayo y en la segunda en los meses de septiembre, octubre y noviembre. Su altura media está en los 2.625 metros sobre el nivel del mar<sup>6</sup>.

En la actualidad, Bogotá está subdividida en 20 localidades (figura 11): Usaquén, Chapinero, Santa Fe, San Cristóbal, Usme, Tunjuelito, Bosa, Kennedy, Fontibón, Engativá,

---

<sup>6</sup> Consultado en página web: [www.bogota.gov.co](http://www.bogota.gov.co)

Suba, Barrios Unidos, Teusaquillo, Los mártires, Antonio Nariño, Puente Aranda, Candelaria, Rafael Uribe Uribe, Ciudad Bolívar y Sumapaz.

**Figura 10.**

*Mapa de Bogotá y sus localidades.*



*Nota.* Tomado de secretaria Distrital de planeación de Bogotá, 2020.

Teniendo en cuenta que muchas de las fuentes locales de emisión en las grandes ciudades hacen parte de actividades antrópicas de los sectores urbanizados y con actividad industrial, para el caso de Bogotá la Secretaria de Ambiente elabora un compendio en lo referente al inventario de emisiones de la ciudad para un grupo de contaminantes atmosféricos.

Los inventarios de emisión de contaminantes atmosféricos son considerados una herramienta útil para cuantificar las emisiones producidas por las diversas fuentes de una ciudad o región. Brindan información técnica provechosa para la autoridad ambiental para los siguientes propósitos: herramienta de diagnóstico para gestionar la calidad del aire de su jurisdicción,

soporte técnico para la formulación de políticas y estrategias de mitigación, información de entrada para calificar a través de modelación de calidad del aire la efectividad de acciones, pronóstico periódico de calidad del aire, entre otros propósitos <sup>7</sup>.

En general, los inventarios de emisiones son fuentes de información puntual para el ciudadano, ya que le permite conocer las causas principales de la contaminación atmosférica; además de obtener un soporte técnico de como nuestras actividades diarias impactan a la calidad del aire de manera directa o indirecta.

Actualmente, para la ciudad de Bogotá se han estimado los inventarios de emisiones con base en las siguientes fuentes de emisión identificadas y soportadas hasta el momento (Figura 11) : fuentes móviles en ruta (vehículos), fuentes móviles fuera de ruta (maquinaria amarilla, maquinaria agrícola y maquinaria industrial), fuentes fijas industriales, fuentes fijas comerciales, fuentes fijas de área (centros de almacenamiento de combustibles), resuspensión de material particulado en la malla vial por el paso vehicular, construcciones, incendios forestales, entre otras<sup>8</sup>.

### **Figura 11.**

*Fuentes de emisiones identificadas para la ciudad de Bogotá.*

---

<sup>7,8</sup> Secretaria Distrital de Ambiente -SDA- diciembre de 2020, Bogotá – Colombia. *Inventario de emisiones de Bogotá, Contaminantes atmosféricos*. Año:2018, p. 8 y 10.



*Nota.* El gráfico representa la clasificación de las fuentes para la ciudad de Bogotá. Cabe resaltar que las fuentes de emisión que tienen inventarios de emisiones para Bogotá son las que figuran con texto de color negro mientras que algunas no cuentan con inventarios (corresponden a las que figuran en texto de color gris). A la fecha de corte de 2018, algunas de las fuentes identificadas no cuentan con inventario de emisiones. Tomada de *Inventario de emisiones de Bogotá, Contaminantes atmosféricos*. Secretaria Distrital de Ambiente. Año:2018, p. 13.

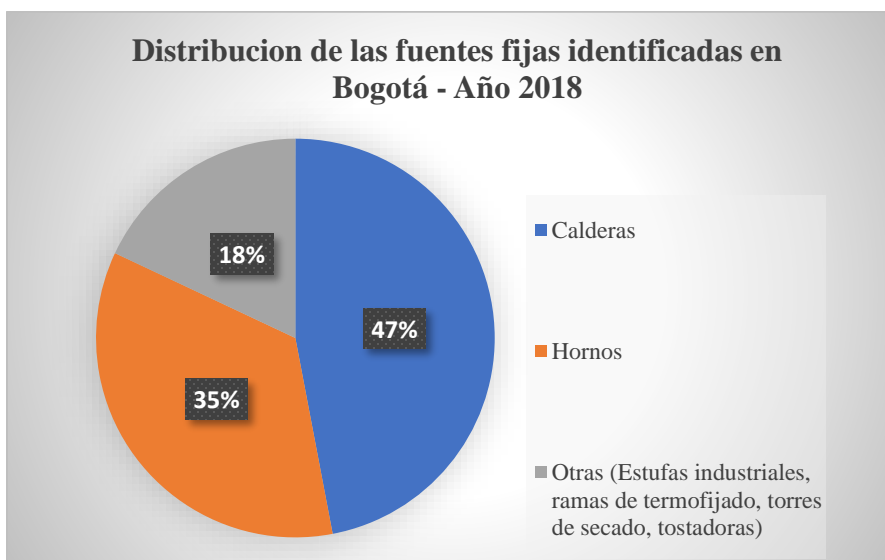
En concordancia con lo expuesto en la nota de la figura 12, al año 2020 oficialmente se encuentra publicado para la capital Colombiana el inventario de emisiones del año 2018 de las siguientes fuentes de emisión: combustión en fuentes fijas industriales, combustión en fuentes móviles en ruta, emisiones por resuspensión de polvo en vías por el tránsito de fuentes móviles en ruta y emisiones por combustión de fuentes móviles fuera de ruta (maquinaria amarilla).

Teniendo en cuenta que los principales focos de emisión de gases de la familia NO<sub>x</sub> en las grandes ciudades industrializadas y urbanizadas, provienen de fuentes fijas industriales y fuentes móviles en ruta (Tian et al., 2022b); en este documento se dan a conocer las cifras de interés en lo que respecta a la identificación y cuantificación de las fuentes fijas para la ciudad de

Bogotá al año 2018, de acuerdo a los datos primarios publicados en el respectivo inventario. Se identificaron 2046 fuentes fijas en operación, de las cuales 2030 fuentes corresponden a equipos de combustión externa distribuidos en las siguientes actividades (Figura 12):

**Figura 12.**

*Distribución porcentual de las fuentes fijas identificadas para Bogotá al año 2018.*



*Nota.* Adaptada con las cifras reportadas en el *Inventario de emisiones de Bogotá, Contaminantes atmosféricos*. Secretaria Distrital de Ambiente. Año:2018, p. 1.

Por otra parte, en lo relacionado a la estimación de emisiones generadas por las fuentes móviles en ruta a causa de sus procesos de combustión, la recopilación de la información por parte de la Secretaria Distrital de Ambiente se ha soportado mediante cifras reportadas por el registro distrital automovilístico – RDA, Centros distritales automotrices – CDA, e información de la matriz origen-destino, conteos vehiculares y del Sistema Integrado de Información sobre Movilidad Urbana Regional – SIMUR, de la Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá.

Con base en las estimaciones reportadas a través del inventario consolidado de emisiones para la ciudad de Bogotá representativo para el año 2018 por la SDA, se identificaron como mayores aportantes de contaminantes en la forma de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y compuestos orgánicos volátiles (COV) a las fuentes móviles en ruta (en carretera), así como las de fuera de ruta (fuera de carretera) y las fuentes fijas (Industriales). Por lo anterior, en la tabla 7 se dan a conocer las estimaciones de las emisiones de dichos contaminantes (Ton/año) para las fuentes mencionadas.

**Tabla 7.**

*Inventario Consolidado de emisiones de las fuentes móviles y fijas para NO<sub>x</sub> y COV para la ciudad de Bogotá en el año 2018.*

FUENTE	Metodología <sup>9</sup>	Emisiones Tonelada/año		
		NO <sub>x</sub>	COV	
	En carretera	Top- Down	84.032	109.942
<b>MÓVILES</b>	Fuera de carretera	Bottom-Up	88.094	31.522
<b>FIJAS</b>	Industriales	Bottom-Up	1.740	92

*Nota. Adaptada del Inventario Consolidado de emisiones para la ciudad representativo para el año 2018, (Secretaria Distrital de Ambiente, 2020).*

Una vez identificadas las fuentes de emisión con mayor contribución de NO<sub>x</sub> a la atmósfera de Bogotá, es importante conocer con mayor especificidad las categorías de los medios de transporte que hacen parte de este grupo mayoritariamente emisor de NO<sub>x</sub> (Fuentes

<sup>9</sup> La SDA ha estimado las emisiones bajo dos enfoques: (1) El enfoque Bottom-Up, en el cual se emplea la información lo más desagregada posible espacialmente sobre la ciudad, como insumo a las estimaciones, y (2) el enfoque Top-Down, en el cual se emplean valores representativos de la ciudad para realizar la estimación.

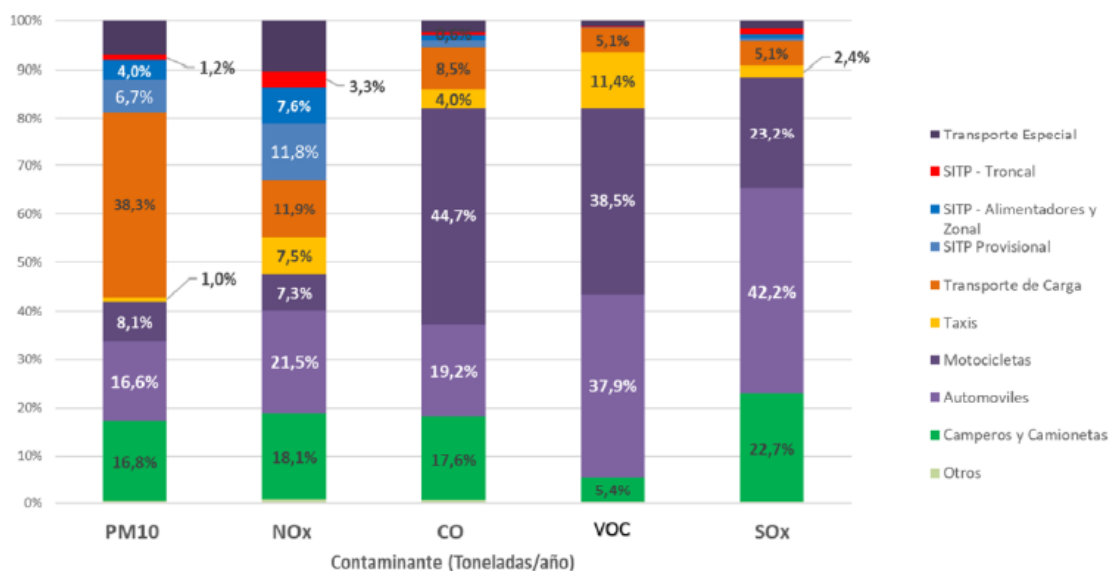
móviles en ruta o carretera), además de su distribución espacio temporal a nivel local de la ciudad.

## 2.1 Inventario de Emisiones de NO<sub>x</sub> por combustión de Fuentes móviles en carretera.

Con base en el inventario de emisiones del año 2018, de las 84.032 toneladas/año de emisiones de NO<sub>x</sub> se encuentra que para las categorías vehiculares los mayores aportantes de este contaminante criterio son los automóviles con un aporte del 21,5%, seguido por la contribución conjunta de alrededor de un 20% de los buses pertenecientes al Sistema Integrado de Transporte Público – SITP (buses zonales y provisionales), en tercer lugar figuran los camperos y camionetas con un 18,1% (Figura 13) (Secretaría Distrital de Ambiente, 2020).

**Figura 13.**

*Participación en emisión de combustión de contaminantes criterio por categoría vehicular, año 2018.*



*Nota.* Gráfico tomado de Inventario de emisiones de Bogotá, Contaminantes atmosféricos.

Secretaría Distrital de Ambiente. Año:2018, p. 45.

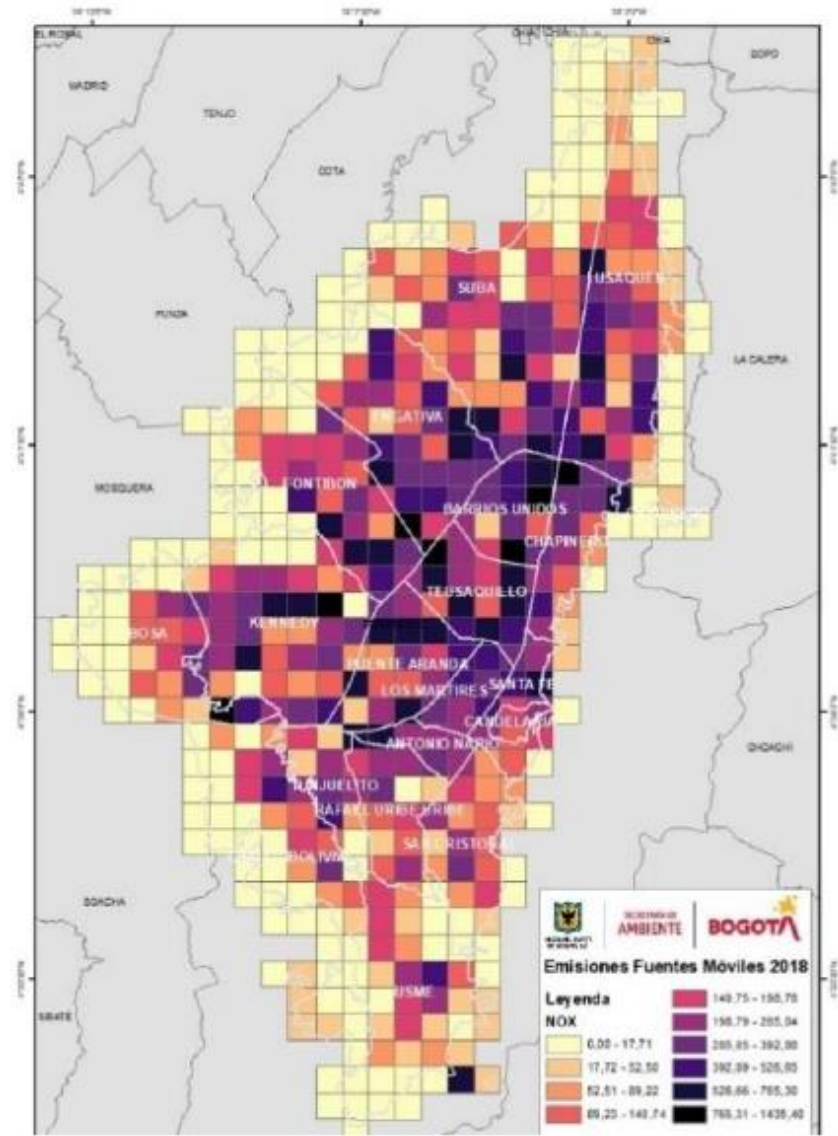
Comparando dichos aportes significativos de Nox, se podría inferir que las altas concentraciones del contaminante en las zonas urbanas de las grandes ciudades como Bogotá, se atribuyen a los gases de escape provenientes de procesos de combustión de vehículos automotores como los camiones, automóviles, buses, camperos y camionetas operados con combustibles como la gasolina y el diésel (Tian et al., 2022).

Complementario a la identificación de las fuentes móviles con mayor aporte en las emisiones de NO<sub>x</sub>, en la figura 14 se observan los mapas de distribución espacial para las fuentes móviles de emisión a nivel local de Bogotá. Este mapa fue obtenido a partir de los datos primarios de las concentraciones diarias reportadas para este contaminante criterio. Como se observa en el mapa, se encuentran concentradas las emisiones más altas en la zona centro de la ciudad en un rango de 392.85 a 1435.40 ton/año.

En esta zona confluyen corredores viales con alto flujo vehicular de la ciudad, como la autopista norte, la carrera 30, calle 13 y la autopista sur, vías principales en las cuales transitan vehículos de carga pesada operados con diésel, además de un alto flujo de automóviles que emplean gasolina.

**Figura 14.**

*Distribución espacio temporal de emisiones de NO<sub>x</sub> (ton/año) para Fuentes Móviles en Bogotá.*



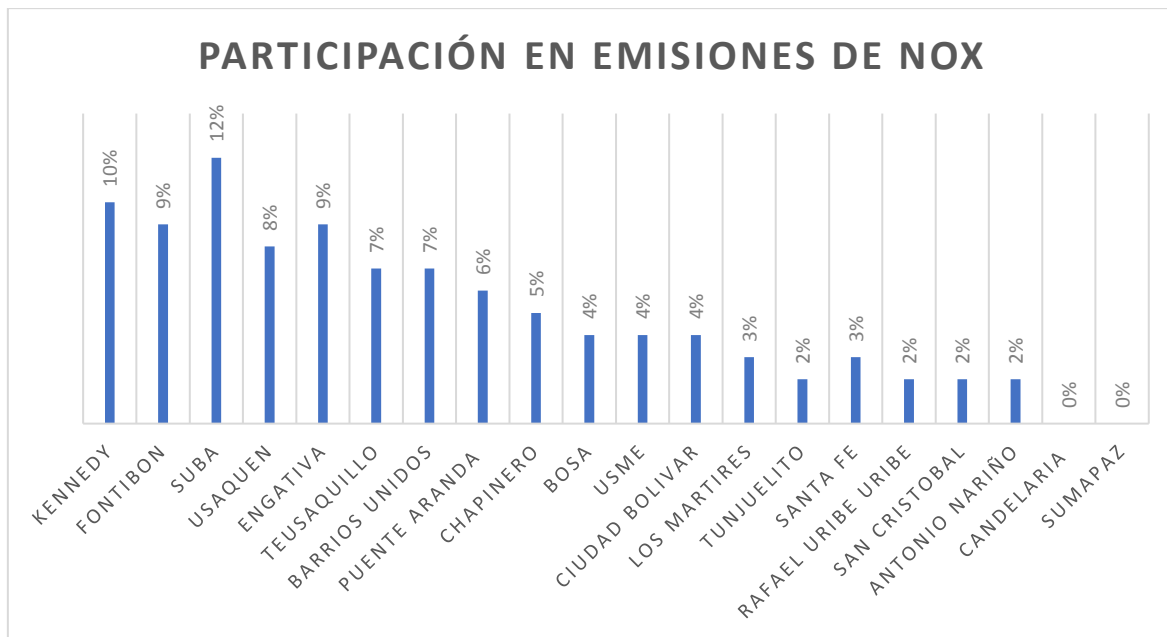
*Nota.* Gráfico tomado de Inventario de emisiones de Bogotá, Contaminantes atmosféricos. Secretaria Distrital de Ambiente. Año:2018, p. 46.

Con la revisión de la data reportada en el informe del inventario de emisiones, en lo que respecta a las emisiones estimadas de NO<sub>x</sub> por localidad, la figura 15 representa su participación en emisiones; identificándose como principales aportantes las localidades de la zona suroccidental de la ciudad como Kennedy, mientras que por la zona noroccidental las localidades de Suba, Engativá, Fontibón, y por la zona centro occidental Usaquén. Cabe resaltar, que por

estas localidades se encuentran ubicadas los principales corredores de tráfico pesado que conducen a otras ciudades aledañas a la capital.

**Figura 15.**

*Participación por localidad en las emisiones de fuentes móviles en carretera.*



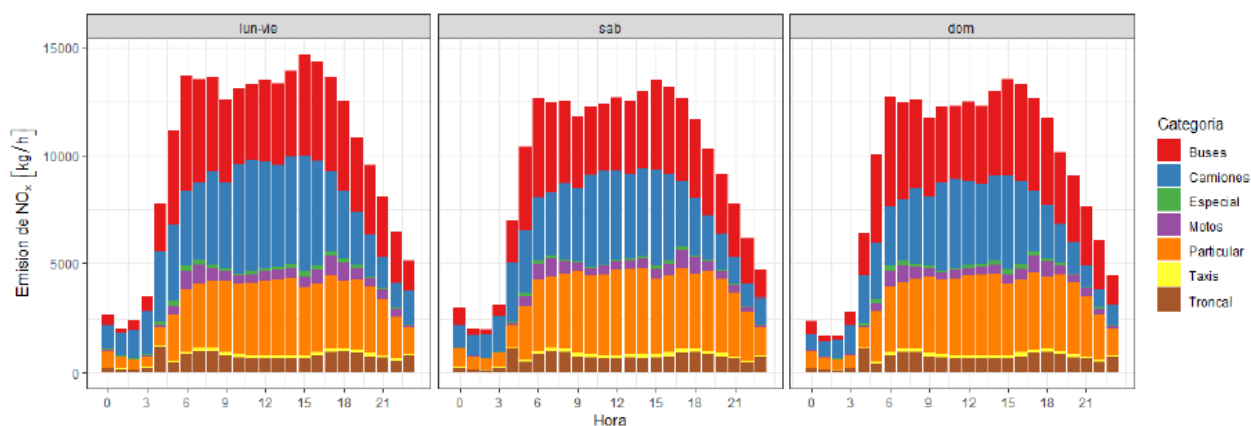
*Nota.* Gráfico adaptado de Inventario de emisiones de Bogotá, Contaminantes atmosféricos. Secretaria Distrital de Ambiente. Año:2018, p. 48.

Por otra parte, de acuerdo con el perfil de distribución temporal para las emisiones de NO<sub>x</sub> en los días hábiles (lunes a viernes), sábados y domingos (Figura 16), el comportamiento horario de las emisiones generadas por fuentes móviles en carretera como buses, camiones, transporte especial, motos, carro particular en modalidad de automóviles, camperos, servicio público (taxis), troncales (articulados y biarticulados); demuestra que las categorías del parque automotor como camiones, vehículos particulares y buses presentan una mayor aporte de emisiones al año 2018 (Secretaria Distrital de Ambiente, 2020).

El comportamiento de la distribución temporal, corresponde a lo esperado en las horas pico al haber un máximo valor de emisión entre las 05:00 a.m y 08:00 a.m; lográndose una estabilidad en la composición de contaminantes en el aire que viene a cambiar de nuevo con un incremento entre las 16:00 a 19:00 horas de la tarde, para su posterior disminución (Secretaria Distrital de Ambiente, 2020).

### Figura 16.

*Distribución horaria para Fuentes Móviles 2018, según categoría vehicular para el contaminante NO<sub>x</sub>.*



*Nota.* Gráfico tomado de Inventario de emisiones de Bogotá, Contaminantes atmosféricos. Secretaria Distrital de Ambiente. Año:2018, p. 50.

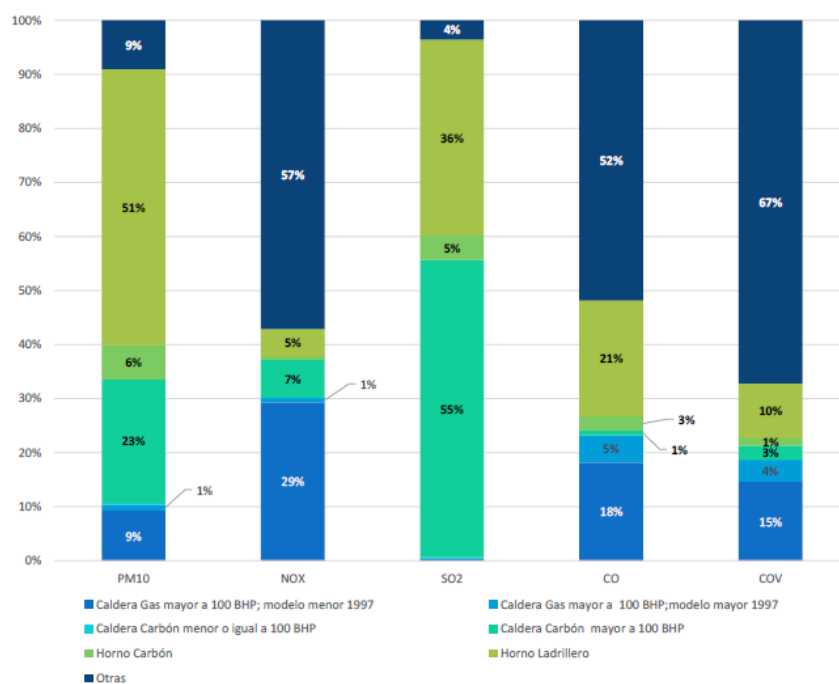
## 2.2 Inventario de Emisiones de NO<sub>x</sub> por combustión de fuentes fijas industriales.

El compendio de datos de las emisiones de contaminantes criterio generadas por los diferentes tipos de fuentes fijas industriales se presenta en la Figura 17. Con base a los porcentajes de participación reportados, se observa que uno de los mayores aportantes de óxidos

de nitrógeno son las calderas de gran capacidad operadas con gas natural (categoría industrial tipo CG1 años modelo previo a 1997 ) con una participación significativa del 29,5% (Secretaria Distrital de Ambiente, 2020). Estos resultados, pueden estar asociados a los cambios de tecnología de calderas industriales para ser operadas con gas natural y así mitigar el uso de carbón, que emite concentraciones considerables de material particulado. Si bien al emplearse gas natural para operar este tipo de maquinaria, se ve un comportamiento positivo por la disminución de las emisiones de material particulado; hay una tendencia poco favorable por el incremento de emisiones de NO<sub>x</sub> por los altos volúmenes de emisiones de los escapes totales de calderas que operan a altas temperaturas (Zhao et al., 2019).

### Figura 17.

*Participación por tipo de fuente en las emisiones de contaminantes criterio para el año 2018.*



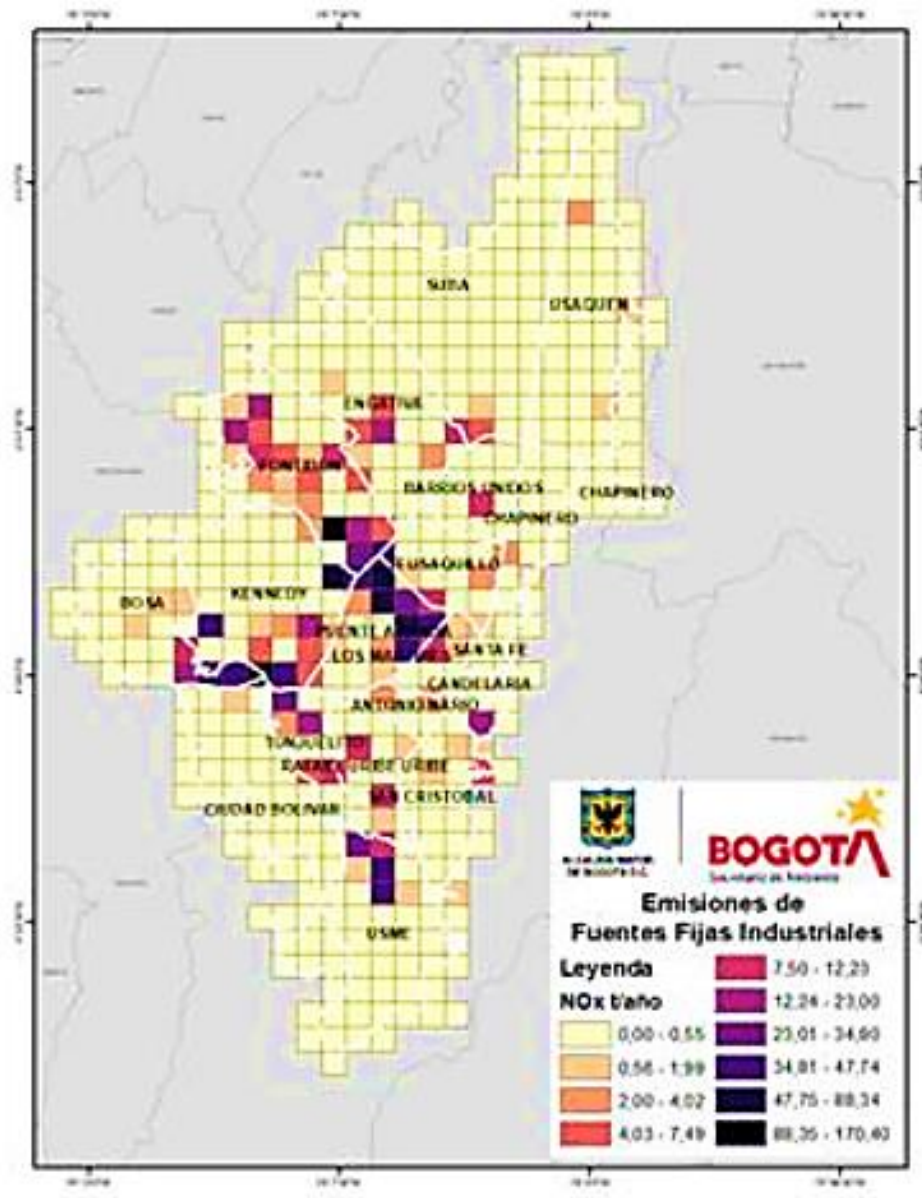
*Nota.* Gráfico tomado de Inventario de emisiones de Bogotá, Contaminantes atmosféricos. Secretaria Distrital de Ambiente. Año:2018, p. 59.

Con la identificación de las fuentes fijas industriales que aportan en mayor proporción en las emisiones de NO<sub>x</sub>, en la figura 18, se observa el mapa de distribución espacio temporal resultante de las emisiones diarias de este contaminante criterio provenientes de este tipo de fuentes para el año 2018 en la ciudad de Bogotá. Claramente se observa que las emisiones de los NO<sub>x</sub> se concentran en las localidades de Fontibón, Puente Aranda y Kennedy.

Lo anterior puede estar asociado al uso de GLP como combustible, que si bien es catalogado como un combustible "limpio" porque no produce emisiones significativas de material particulado; si produce contaminantes gaseosos como los NO<sub>x</sub> y COV, así como bajas concentraciones de SO<sub>2</sub>.

**Figura 18.**

*Distribución espacio temporal de NO<sub>x</sub> para Fuentes fijas industriales en día hábil.*



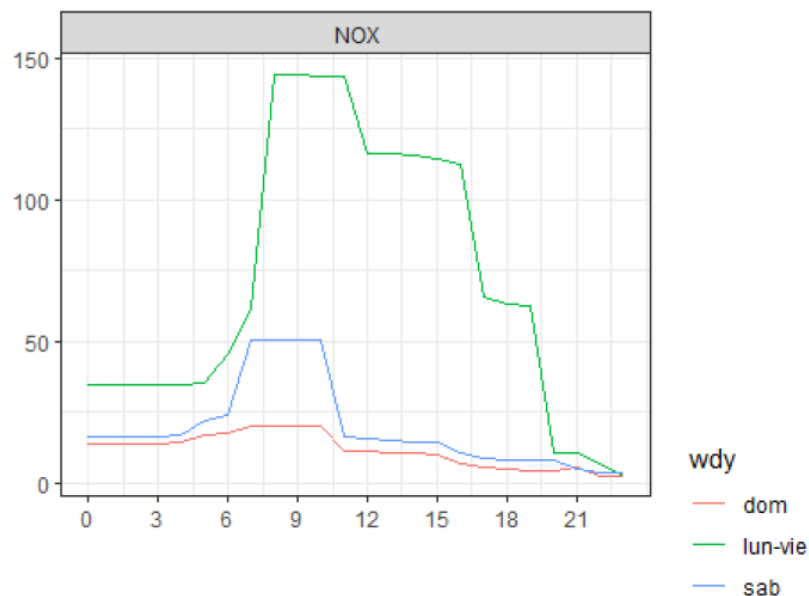
*Nota.* Gráfico tomado de Inventario de emisiones de Bogotá, Contaminantes atmosféricos. Secretaria Distrital de Ambiente. Año:2018, p. 60.

Para este tipo de fuentes fijas, se plasmó la desagregación temporal de emisiones de NO<sub>x</sub> (Figura 19). El perfil horario para las emisiones de las fuentes fijas industriales presenta una marcada tendencia con pico altos de emisión para los días hábiles (lunes a viernes) y fines de semana entre 06:00 a.m y 11:00 a.m. Por otra parte, se evidencia una notable reducción de

emisiones, sobre el medido día tanto para días hábiles, como para sábados y domingos. Lo anterior puede estar altamente influenciado por el inicio de actividades de las industrias en las primeras horas de la mañana, en especial entre los días hábiles de la semana.

**Figura 19.**

*Perfil horario de las emisiones de NO<sub>x</sub> por combustión de las fuentes fijas industriales.*



*Nota.* En este gráfico se muestra el perfil de emisiones del contaminante NO<sub>x</sub>. El eje Y representa las emisiones de (g/h) y el eje X el horario para los días monitoreados. Tomado del Inventario de emisiones de Bogotá, Contaminantes atmosféricos. Secretaria Distrital de Ambiente. Año:2018, p. 63.

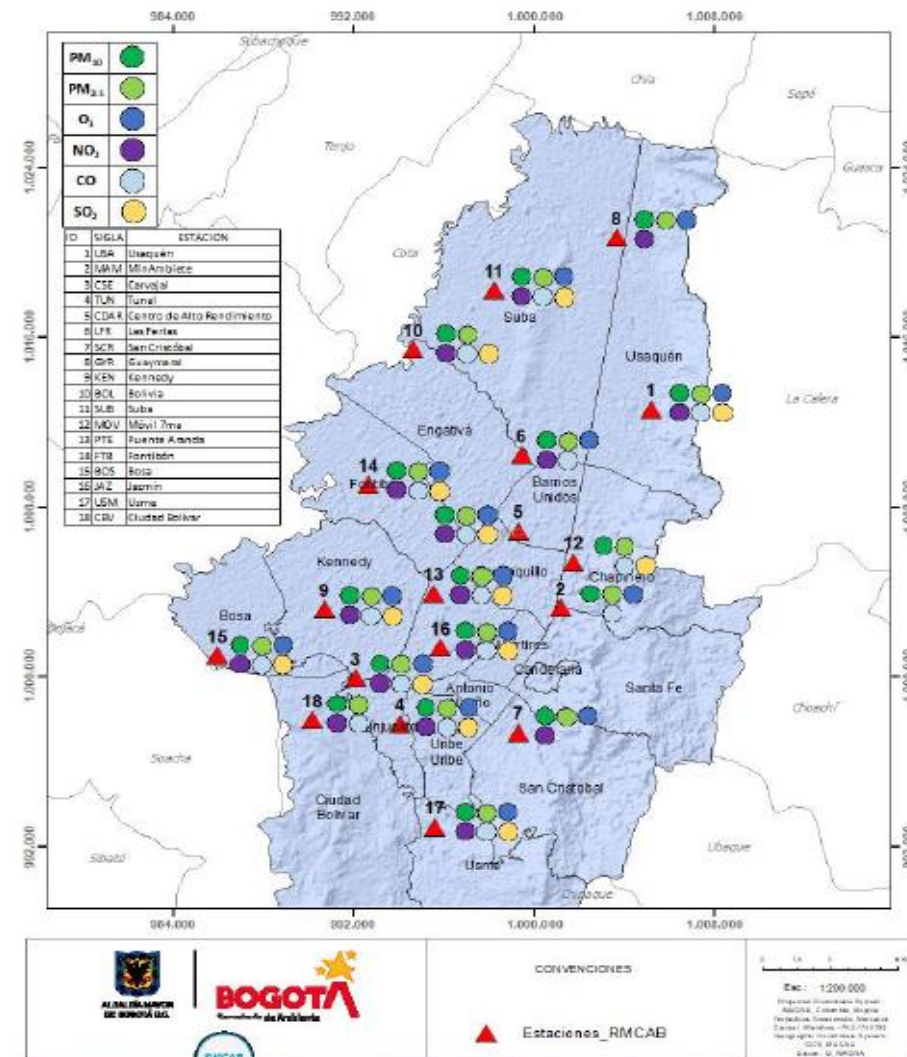
### 2.3. Emisiones de NO<sub>2</sub> monitoreadas y reportadas para Bogotá en el año 2020.

Con base en los datos reportados por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá – RMCAB a través del informe anual de calidad del aire de Bogotá, para el 2020 la red estaba conformada por dieciocho (18) estaciones de monitoreo de las cuales diecisiete (17) son fijas, y

una (1) es móvil. En el mapa de la Figura 20, se da a conocer la ubicación de las 18 estaciones de monitoreo de la RMCAB operadas durante el año 2020.

**Figura 20.**

*Ubicación de las estaciones de monitoreo de contaminantes de la RMCAB – Año 2020.*



*Nota. Tomado de (Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, (RMCAB), 2021)*

Las variables monitoreadas para cada estación de monitoreo de la RMCAB durante el año 2020 se encuentran en el Apéndice B. Para efectos de entender algunas de las gráficas y

tablas correspondientes a los resultados de los monitoreos en cada estación, se usan las siguientes siglas (Tabla 8):

**Tabla 8.**

*Siglas asignadas por la RMCAB para cada estación de monitoreo operada en el año 2020.*

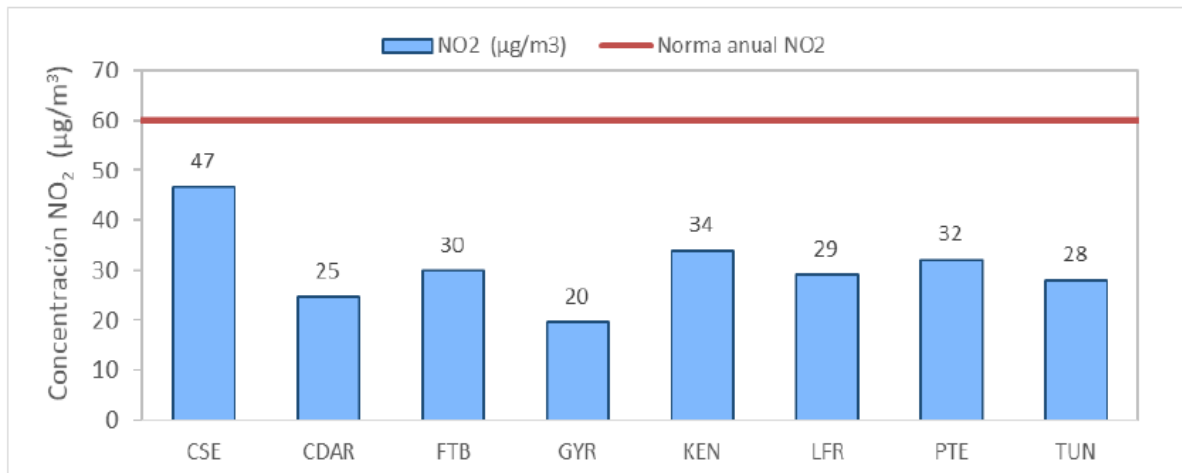
<b>Estación</b>	Guaymaral	Usaquén	Suba	Bolivia	Las Ferias	Centro de Alto Rendimiento
<b>Sigla</b>	GYR	USQ	SUB	BOL	LFR	CDAR
<b>Estación</b>	MinAmbiente	Móvil 7ma	Fontibón	Puente Aranda	Jazmín	Kennedy
<b>Sigla</b>	MAM	MOV	FTB	PTE	JAZ	KEN
<b>Estación</b>	Carvajal - Sevillana	Bosa	Tunal	Ciudad Bolívar	San Cristóbal	Usme
<b>Sigla</b>	CSE	BOS	TUN	CBV	SCR	USM

Para los cálculos aplicados en la obtención de los resultados reportados por la RMCAB, para cada contaminante monitoreado, se procedió a usar datos con un % de representatividad temporal no menor del 75% como lo estipula el manual de operación de Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA).

Para las concentraciones promedio anuales de NO<sub>2</sub> se tiene que las más altas registradas para el año 2020 fueron las reportadas por las estaciones Carvajal-Sevillana y Kennedy pertenecientes a la zona suroccidental, con resultados de 46.8 y 33.9 µg/m<sup>3</sup> respectivamente; mientras que las concentraciones más bajas fueron reportadas en 19.7 y 22.0 µg/m<sup>3</sup> por las estaciones de Guaymaral y Suba (Figura 20).

**Figura 21.**

*Concentraciones promedio anual de NO<sub>2</sub> – Año 2020.*



*Nota. Tomado de* (Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, (RM CAB), 2021)

Cabe mencionar, que durante el año 2020 no se registraron excedencias a la norma para las concentraciones promedio a 1 hora (200 µg/m<sup>3</sup>). Los analizadores de NO<sub>2</sub> de las estaciones Bolivia, Bosa, Ciudad Bolívar, Jazmín, San Cristóbal, Usaquén y Usme no cumplieron con el mínimo % de representatividad temporal del 75%, ya que la SDA indica que se instalaron los analizadores automáticos en el mes de octubre de 2020, teniendo en cuenta que la fecha de corte para el informe anual era a diciembre de 2020. (Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, (RM CAB), 2021).

Para enero del año 2020, a nivel mundial se había declarado los inicios de la propagación de una enfermedad infecciosa causada por el virus SARS-CoV-2, usualmente conocido como COVID-19. En nuestro país, se empiezan a detectar los primeros casos para febrero de ese año, incrementándose el número de personas contagiadas para marzo y abril de 2020. Lo anterior, llevó al gobierno nacional a declarar una emergencia sanitaria por las altas cifras de contagios y muertes asociadas a este virus, lo cual llevó a implementarse medidas a nivel nacional como el

confinamiento obligatorio de la mayoría de los habitantes, con el fin de mitigar su propagación en espacios públicos (Malagón-Rojas et al., 2022).

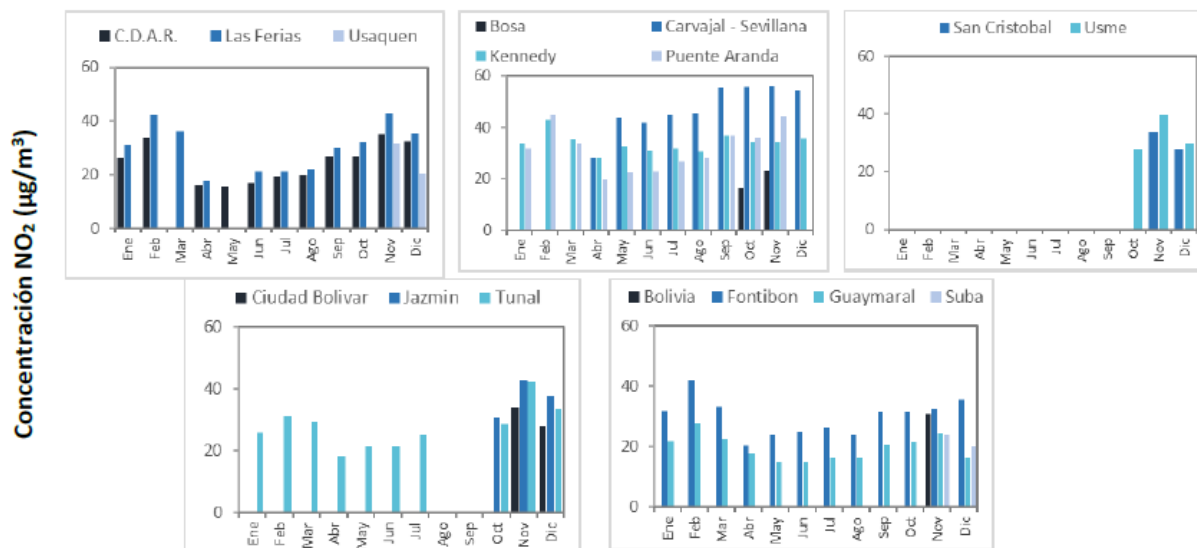
Tal confinamiento, permitió que para el segundo trimestre del año muchos habitantes trabajaran desde sus casas, reflejándose así, una acentuada disminución del tráfico vehicular en la ciudad de Bogotá ya que los trabajadores de algunos gremios no debían desplazarse hasta sus lugares de trabajo. Así mismo, se redujeron las operaciones de algunas fábricas manufactureras e industriales ubicadas en los sectores como Kennedy, Carvajal – Sevillana y Puente Aranda.

Con base en la adquisición de datos reportados por la SDA (Figura 22), hay una marcada disminución en el mes de Abril al mes de Marzo de las concentraciones detectadas de NO<sub>2</sub> para todas las estaciones que monitorean este gas; lo cual podría estar vinculado a la disminución de actividades antropogénicas como el uso de vehículos automotores y vuelos aéreos como de la baja operación de plantas del sector industrial y manufacturero a causa del confinamiento obligatorio de los habitantes de Bogotá.

Por otra parte, se presentó un incremento considerable de las concentraciones registradas para el contaminante NO<sub>2</sub> durante el último trimestre del 2020 en todas las estaciones de monitoreo, lo cual estaría estrechamente relacionado a la reactivación económica de algunos sectores productivos de la ciudad teniendo en cuenta el estricto confinamiento obligatorio mantenido hasta el mes de agosto.

**Figura 22.**

*Concentraciones mensuales de NO<sub>2</sub> por estación – Año 2020.*

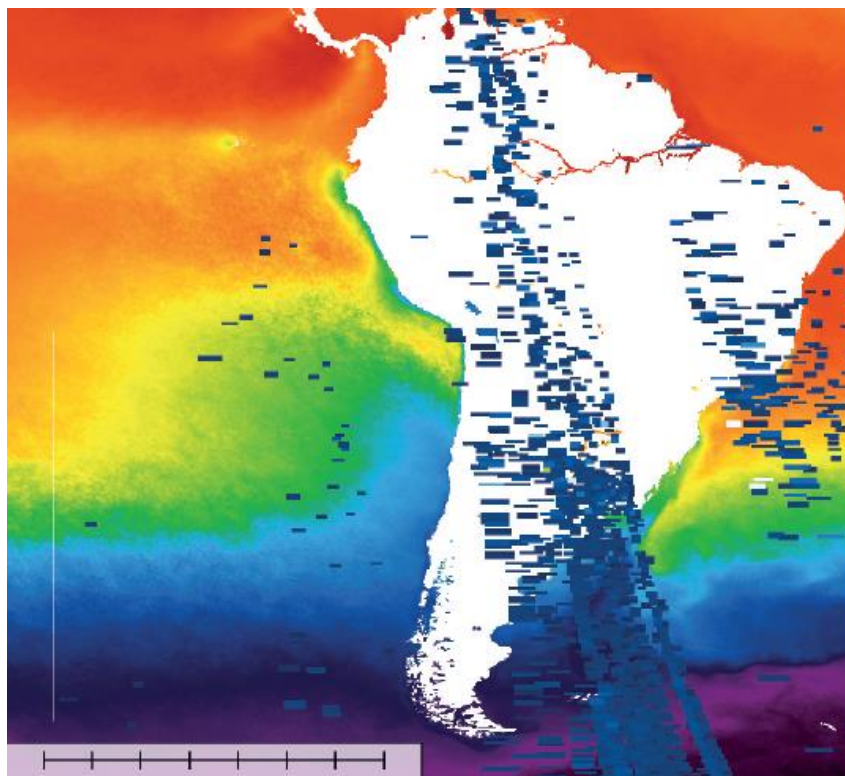


*Nota. Tomado de* (Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, (RMCAB), 2021)

El anterior comportamiento de emisiones de los gases de NO<sub>2</sub>, también reflejaron una situación similar en otras grandes ciudades urbanizadas de América del Sur. Algunas investigaciones de análisis espectral, demostraron que la densidad del contaminante NO<sub>2</sub> y su distribución espacial a nivel de la troposfera (10 m.s.n.m) soportada a través de las imágenes satélites captadas por el satélite LANDSAT 8 del Servicio Geológico de EE. UU. (USGS, Science for a Changing World), muestran una marcada acumulación de este contaminante (nubes de color azul) en las zonas más urbanizadas de algunos países del continente suramericano (Figura 23) (Romero Baylón & Iglesias León, Silvia del Pilar, 2020).

### Figura 23.

*Imágen satelital del LandSat 8 mostrando la densidad de nube de distribución NO<sub>2</sub> troposférico a los 10 m.s.n.m.*



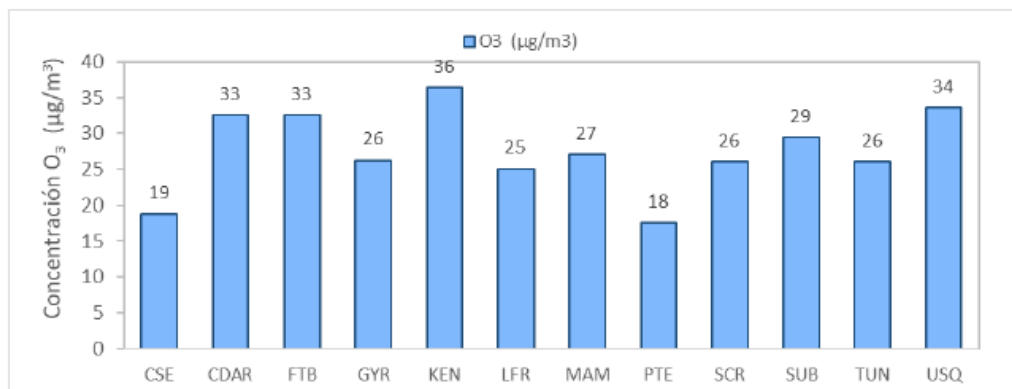
*Nota. Imagen tomada de (Romero Baylón & Iglesias León, Silvia del Pilar, 2020), p.135.*

#### **2.4 Emisiones de O<sub>3</sub> troposférico monitoreadas y reportadas para Bogotá en el año 2020.**

Con base en la data registrada por las estaciones de monitoreo de la ciudad de Bogotá, que cumplieron con el mínimo % de representatividad temporal del 75% estipulado en el protocolo de operación para los SVCA, se observa que los picos de concentración más altos para los promedio anuales de O<sub>3</sub> se registraron en las estaciones de Kennedy con 36.41  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , Usaquén con 34.00  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ; mientras que la concentración más baja se obtuvo en la estación Puente Aranda con 17.59  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, (RMCAB), 2021).

#### **Figura 24.**

*Concentraciones promedio anual de O<sub>3</sub> – Año 2020.*



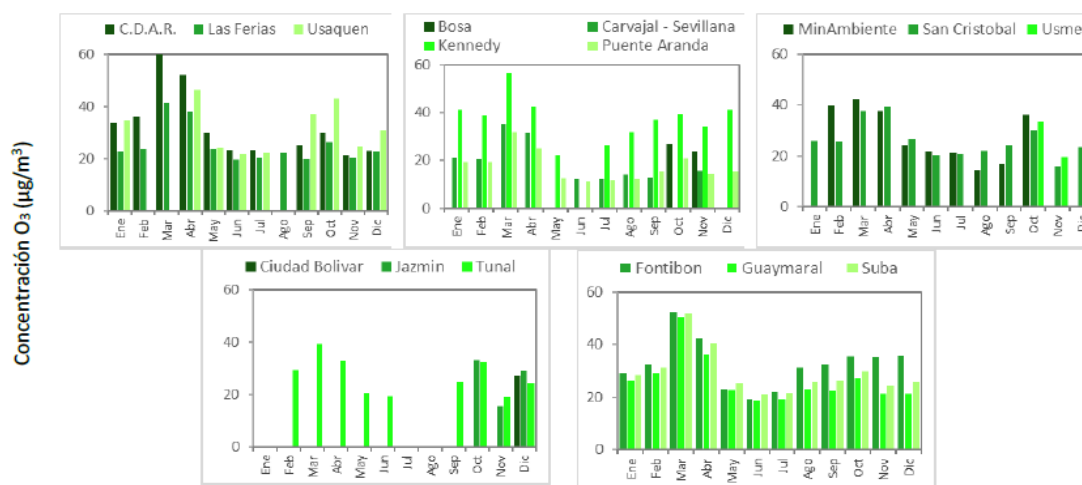
Nota. Tomado de (Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, (RMCAB), 2021).

Por otra parte, los datos capturados y registrados de O<sub>3</sub> para un tiempo de exposición de 8 horas, se evidenció el mayor numero de excedencias en la estación Centro de Alto Rendimiento, cuyo reporte indicó que 133 datos sobrepasaron el límite máximo permisible seguida por la estación Kennedy con 99 excedencias.

Para el año 2020, el comportamiento del O<sub>3</sub> para cada mes se registra en la Figura 23. En la mayoría de las estaciones de monitoreo, para los meses de marzo a abril las concentraciones incrementaron; siendo el promedio de la estación Centro de Alto Rendimiento el más alto de este mes (60 µg/m<sup>3</sup>). También se observa, para los meses consecutivos a abril una variabilidad en las concentraciones, con una marcada tendencia de disminución para el mes de junio seguido por un nuevo incremento hacia el mes de octubre; mes en el cual se observaron los registros más altos en las estaciones Kennedy y Usaquén. En el último trimestre del año en algunas estaciones las concentraciones disminuyeron, mientras que en otras se mantuvieron en valores similares (Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, (RMCAB), 2021).

### Figura 25.

*Concentraciones mensuales de O<sub>3</sub> por estación – Año 2020.*



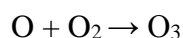
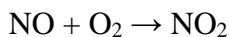
*Nota. Tomado de* (Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, (RMCAB), 2021).

## 2.5 Dinámica de la radiación solar y el NO<sub>2</sub> en el ciclo de formación del O<sub>3</sub> troposférico.

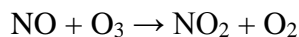
El ozono troposférico es un problema de contaminación atmosférica durante los días en que se registran los días más soleados y con mayor temperatura ambiente. Debido a que la radiación solar recibida en las diferentes capas de la atmosfera desempeña un papel primordial en el ciclo de formación de este contaminante, este proceso también está demarcado por la emisión de NO<sub>x</sub> a la atmosfera, específicamente por la oxidación de los NO provenientes de la combustión de combustibles fósiles como la gasolina, diésel, gas licuado del petróleo (GLP), cuya fotoxidación favorece la formación de NO<sub>2</sub> que es el contaminante criterio monitoreado para efectos de revisión normativa.

Como se ha mencionado anteriormente, el O<sub>3</sub> troposférico es un contaminante secundario ya que no existe ninguna fuente que lo emita directamente. Al tener el O<sub>3</sub> un alto poder oxidante, tiende a presentar un fuerte carácter reactivo que favorece las reacciones con los compuestos reductores, que, para este caso en particular, sería el NO emitido por procesos de combustión a

altas temperaturas. El O<sub>3</sub> superficial y troposférico, se forma por una secuencia de reacciones a partir de su principal precursor como los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y compuestos orgánicos volátiles (COV), especialmente hidrocarburos, en presencia de radiación solar del espectro visible:



En este ciclo de formación de O<sub>3</sub> troposférico, el óxido nítrico (NO) vienen a tener el rol de contaminante primario, emitido principalmente en entornos altamente urbanizados e industrializados, favoreciéndose así su oxidación hasta llegar a la formación de dióxido de nitrógeno. Al descomponerse fotoquímicamente el NO<sub>2</sub>, es liberado el oxígeno atómico que, al combinarse con el oxígeno molecular presente en el aire forman las moléculas de O<sub>3</sub>. Por su alto poder oxidante, el O<sub>3</sub> como producto es tan activo que inmediatamente llega a reaccionar con su primer precursor, el NO, según la reacción :



Dicha reacción de oxidación tiende a ser constante, lo cual hace que el NO tenga muy baja acumulación y tiempo de residencia en el aire. La anterior reacción, también se ve influenciada por la presencia de los COV como algunos hidrocarburos, ya que sus fuerzas de atracción molecular aumentan la afinidad por el NO y por ende compite con el O<sub>3</sub>, permitiendo de alguna manera el aumento de sus concentraciones en la atmósfera.

Este tipo de contaminación fotoquímica suele desarrollarse en entornos urbanos y corredores industriales, especialmente en meses en los que la radiación solar se intensifica. A la

fecha es un tema que ha despertado el interés de estudiarse, en vista de la cantidad de reacciones que intervienen (alrededor de 300) que pueden llegar a presentar diferentes síntesis y vías de reacción de la química orgánica por la variedad de productos intermedios además de los radicales caracterizados por su carácter oxidante, siendo el compuesto más representativo el O<sub>3</sub> (Velázquez de Castro González, Federico & Jiménez Arcas, 2007).

Para el caso de Bogotá, a través del inventario de fuentes móviles y fijas se evidenció que para el año 2018 las fuentes móviles categorizadas como camiones, automóviles, buses, camperos y camionetas presentaron un significativo aporte de NO<sub>x</sub> a la atmósfera en proporción a aquellos que operan usando gas natural vehicular; cuyos principales aportantes fueron las localidades de Kennedy, Fontibón, Suba, Usaquén y Engativá, teniendo en cuenta que por estas zonas de la ciudad se encuentran ubicadas los principales corredores viales de tráfico vehicular y de carga pesada de la ciudad.

En lo que respecta a las fuentes fijas industriales, de acuerdo a los porcentajes de participación en emisiones reportados, se identificaron como mayores aportantes de óxidos de nitrógeno NO<sub>x</sub> a los hornos y calderas que operan a altas temperaturas con gas licuado de petróleo (GLP) y gas natural, con una participación del 31,6%, aportes atribuibles a la gran área industrial y manufacturera concentrada en las localidades de Fontibón, Usaquén y Puente Aranda con una participación en emisiones del 24,3%, 18,3% y 12,4% respectivamente.

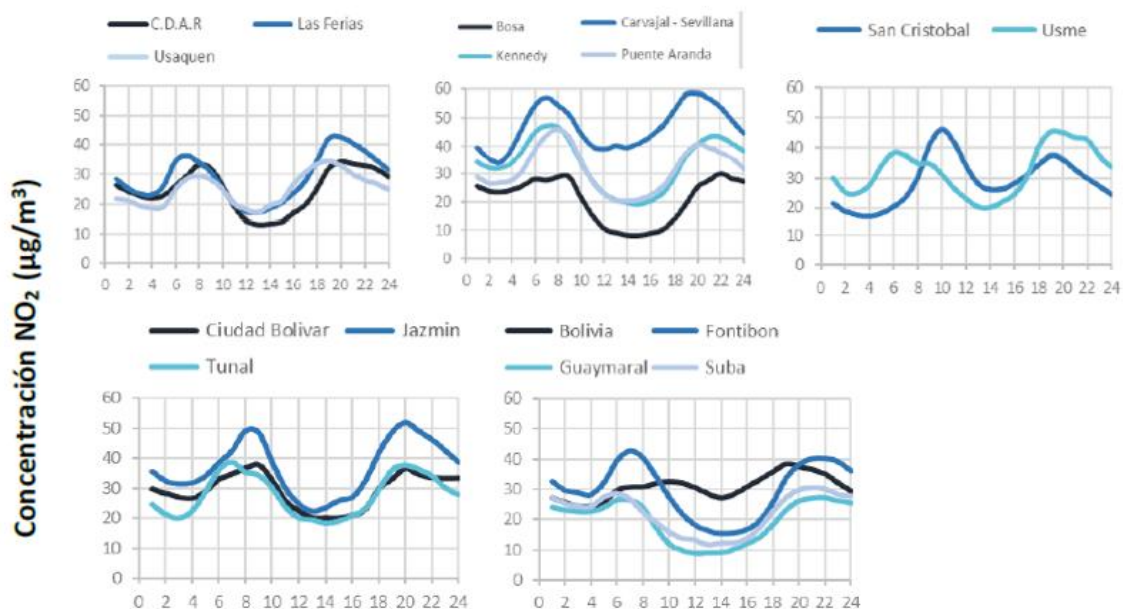
Por otra parte, con base en los datos reportados por la SDA a través del informe anual de calidad de aire de Bogotá del año 2020; en relación con el comportamiento horario en un día promedio para el NO<sub>2</sub> (Figura 26), se evidenció una mayor influencia de las emisiones de este contaminante provenientes de fuentes móviles por los picos marcados de concentración, a las 7:00 a.m. y a las 20:00 p.m.

Las concentraciones más bajas se registraron para horas de la madrugada, cuyo aumento se ve fuertemente marcado entre las 6:00 a.m. y 8:00 a.m. Se presentan una nueva reducción hasta las 10:00 a.m. Se mantienen estos valores bajos de NO<sub>2</sub> desde el mediodía hasta las 17:00 p.m. de la tarde, con un posterior aumento hacia las 18:00 p.m. Este segundo pico mantiene su tendencia hasta las 22:00 p.m., y finalmente vuelve a descender.

Estas distribuciones de concentraciones de NO<sub>2</sub> durante las 24 horas del día, están estrechamente relacionadas a la disposición de las fuentes móviles en la ciudad, teniendo en cuenta que en horas de la mañana y al final de la tarde se incrementa el tráfico vehicular por los principales corredores viales de la ciudad como consecuencia del tránsito de personas hacia y desde sus lugares de trabajo empleando transporte público y automóvil particular.

**Figura 26.**

*Comportamiento horario de las concentraciones de NO<sub>2</sub> – Año 2020.*

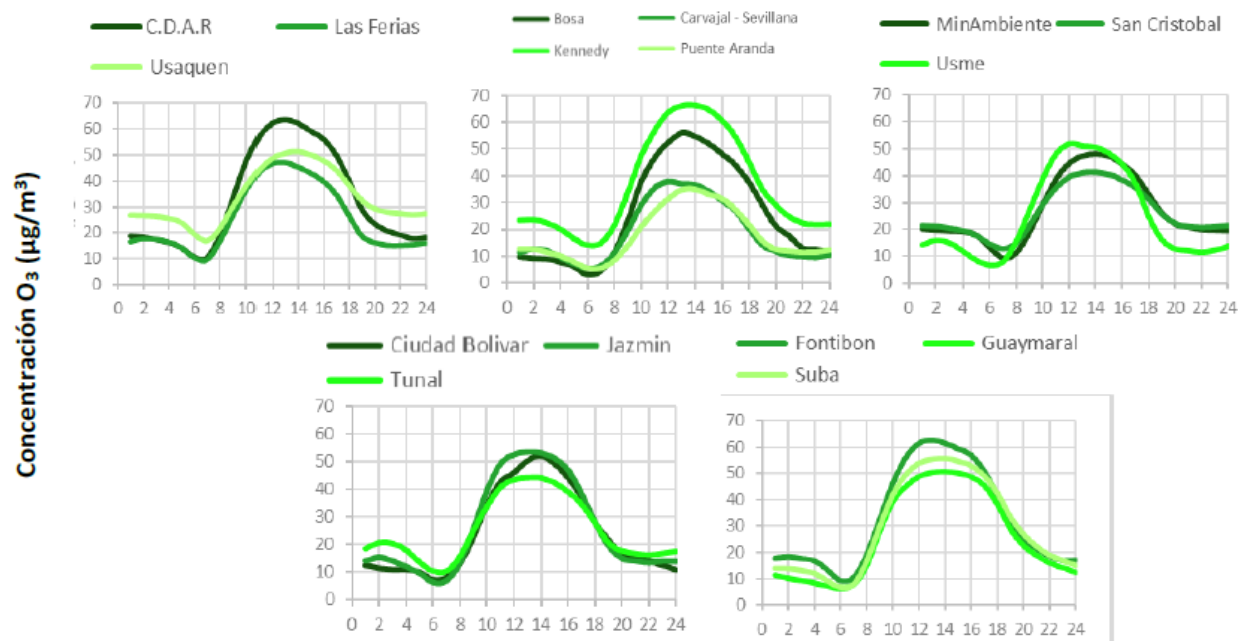


*Nota. Tomado de (Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, (RMCAB), 2021).*

En la Figura 27, se observa el comportamiento del O<sub>3</sub> en un día promedio del año 2020.

**Figura 27.**

*Comportamiento horario de las concentraciones de O<sub>3</sub> – Año 2020.*



*Nota. Tomado de (Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, (RMCAB), 2021).*

En concordancia con los datos reportados para el NO<sub>2</sub> durante el día, su ciclo diario inicia en las primeras horas del día ya que su máxima concentración se reporta entre las 8:00 a.m y las 9:00 a.m. A medida que la intensidad de la radiación solar disminuye, la concentración de O<sub>3</sub> troposférico disminuirá y la concentración de NO<sub>2</sub> aumentará nuevamente en horas de la noche, (20:00 - 22:00 pm), sin embargo, este pico de concentración no es significativo al compararse con el máximo reportado en las primeras horas de la mañana.

Estos niveles de concentración de NO<sub>2</sub> son influenciados por la variación de la radiación solar durante el día, ya que los picos más altos registrados por las estaciones de monitoreo se reportaron hacia la 1:00 p.m. De acuerdo con los registros de la RMCAB, en el 2020 la ciudad de

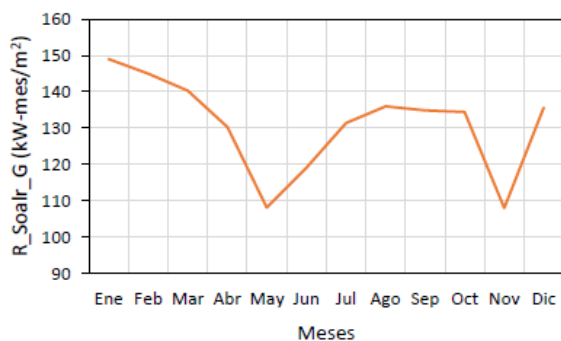
Bogotá acumuló en promedio aproximadamente 1.5 GW/m<sup>2</sup> de energía, que por fenómenos de transportes y transformaciones que se dan por este flujo de radiación en el medio atmosférico, pudo haber sido acumulada de manera diferente durante el ciclo anual.

En relación con la radiación total mensual durante el 2020, en la Figura 26 se especifican las variaciones durante los 12 meses. Se observa que los meses con mayores registros fueron enero, febrero y marzo, siendo el primer mes del año el que registró el mayor acumulado de radiación solar. Este comportamiento puede estar asociado a la altitud, ya que en parte esta determina la cantidad de radiación UV que recibe una zona. Por ejemplo, en zonas de alta montaña la capa atmosférica que debe recorrer los rayos solares es más delgada; de tal manera que a mayor altura mayor radiación UV.

Aunado a lo anterior, otra condición podría ser atribuible a la presencia o ausencia de nubosidad sobre la ciudad de Bogotá, ya que su densidad puede tener un impacto favorable respecto a la cantidad de UV que recibe la superficie terrestre. Usualmente, las nubes densas tienen capacidad de bloquear más radiación UV que una nube delgada; por lo que en ausencia de vapor de agua la posibilidad de formación de nubes es reducida y viceversa.

### Figura 28.

*Comportamiento del promedio mensual de la radiación detectada en Bogotá para el año 2020.*



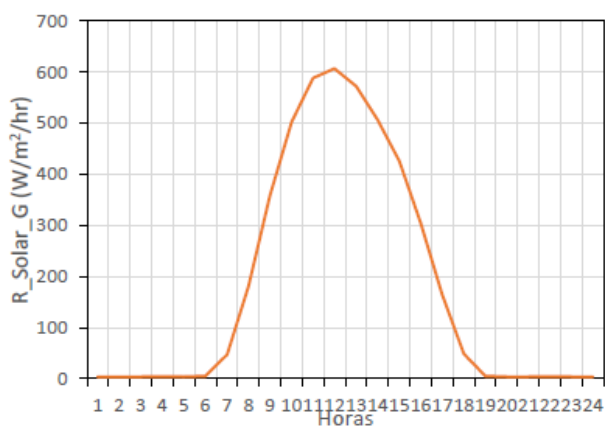
*Nota. Tomado de (Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, (RMCAB), 2021).*

Comparando las concentraciones reportadas de NO<sub>2</sub> y radiación solar para los 3 primeros meses del año 2020, se encuentra que la condición de alta radiación recibida sobre la ciudad de Bogotá favoreció la formación de O<sub>3</sub> troposférico. Tales valores medios reportados ofrecen un perfil orientativo, ya que la presencia de este contaminante en la troposfera está estrechamente ligado a la presencia de sus precursores y a los niveles de radiación solar.

Lo anterior está altamente influenciado por el ciclo de radiación solar, la interacción del sistema Tierra-atmósfera y las características topográficas de la región. La hora en la cual se acumula mayor cantidad de energía en forma de radiación solar sobre la ciudad de Bogotá se halla entre las 11:00 a.m. y la 1:00 p.m. (Figura 29). En tanto que, en las horas de la madrugada y la noche esta cantidad de energía tienden a cero. Estos efectos de energía sobre la ciudad, juegan un papel muy importante sobre las reacciones fotoquímicas de disociación que permiten la generación de ozono troposférico, cuyas concentraciones tienden a tener picos altos para estas horas con mayor temperatura y radiación solar.

### Figura 29.

*Perfil horario de la Cantidad de radiación solar recibida en promedio día – Año 2020.*



*Nota. Tomado de (Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, (RMCAB), 2021).*

### 3. Conclusiones

En las ciudades urbanizadas y con alta actividad industrial como Bogotá las fuentes móviles y las fuentes fijas industriales siguen siendo los principales focos contaminantes que aportan significativamente en las emisiones al aire ambiente de compuestos NO<sub>x</sub>.

Las emisiones registradas de NO<sub>x</sub> para la ciudad de Bogotá durante el año 2020 se asocian principalmente a la contaminación generada por procesos de combustión a alta temperatura ya que los mapas de distribución espacial muestran claramente que las mayores concentraciones de este contaminante primario en las vías principales de la ciudad están asociadas a la combustión interna de los vehículos automotor.

Los NO<sub>x</sub> en la forma de NO y NO<sub>2</sub> desempeñan un papel titular en la formación de contaminantes secundarios como el O<sub>3</sub> troposférico por su alta tendencia a las reacciones fotolíticas bajo condiciones químicas favorables e influencia de la energía emitida por la radiación solar.

Las concentraciones más altas de NO<sub>2</sub> para el año 2020 en la ciudad de Bogotá se registraron en las estaciones Carvajal-Sevillana y Kennedy, la cuales se encuentran ubicadas en sectores con alto flujo de fuentes móviles y constante operación de plantas industriales que usan combustibles fósiles como el GLP, diesel o gasolina.

La dinámica atmosférica respecto a las concentraciones monitoreadas de NO<sub>2</sub> y la radiación solar registrada para el año 2020 en la ciudad de Bogotá evidencian que el proceso de formación de este contaminante primario tiene una alta tendencia de ser cíclico ya que en algunas de las etapas en la reacción para su formación se genera como producto el NO compuesto que frente a un agente oxidante como el O<sub>3</sub> reaccionan para formar el NO<sub>2</sub> inicial.

El promedio anual más alto reportado para O<sub>3</sub> en el año 2020 en la ciudad de Bogotá se evidenció en la localidad de Kennedy, con 36.410 µg/m<sup>3</sup>, y con excedencias principalmente en Centro de Alto Rendimiento demostrando así que una ciudad con alto flujo vehicular y activa operación industrial hacen parte de las actividades antropogénicas que generan los picos de emisión de su principal precursor fotoquímico el NO<sub>2</sub>.

Los cambios de las concentraciones de O<sub>3</sub> en la ciudad de Bogotá para el año 2020 presenta una tendencia de aumento con relación al incremento de las concentraciones de NO<sub>2</sub> reportadas especialmente para el último trimestre de ese periodo anual por la reactivación económica que hubo después del confinamiento obligatorio en el segundo trimestre de ese año a causa de la pandemia por el virus Covid-19.

#### **4. Recomendaciones**

Es importante actualizar la información en lo que respecta al inventario de fuentes fijas y móviles para la ciudad de Bogotá y así poder usar datos más recientes para una correlación óptima a la hora de compararse con los informes del estado de la calidad del aire a nivel local y a nivel nacional cuando se necesite estudiar la dinámica atmosférica de los NO<sub>x</sub> y O<sub>3</sub> troposférico y otros contaminantes.

Se incentive entre el gremio académico y autoridades ambientales un estudio más detallado sobre la dinámica de los NO<sub>x</sub> en la ciudad de Bogotá con relación a otros factores meteorológicos como la intensidad solar, velocidad temperatura y tiempo transcurrido entre la emisión de NO<sub>x</sub> y la formación de O<sub>3</sub>.

Es primordial seguir analizando el comportamiento del O<sub>3</sub> troposférico para evaluar si las concentraciones de este contaminante secundario siguen generando impactos para la salud y el medio ambiente, además de evaluar la tendencia a lo largo de los años en vista del aumento de la población mundial que conllevan al incremento de las actividades antropogénicas contaminantes.

### Referencias Bibliográficas

- A K Srivastava. (2012). Black carbon aerosols. *Environmental Research Letters*, , 2. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/7/1/014002/pdf>
- Andino-Enríquez, M. A., Hidalgo-Bonilla, S. P., & Ladino, L. A. (2018). Comparación de los Niveles de Concentración de Ozono Troposférico y Dióxido de Nitrógeno en Ecuador y Otras Latitudes. *Bionatura*, 3(2)<https://10.21931/RB/2018.03.02.5>
- Azeez, L., Oyedeji, O.A., Adewuyi, S.O., et al. (2016). Precursors influencing tropospheric ozone formation and apportionment in three districts of ilupeju industrial estate, lagos. . *Am. J. Chem.*, , 65-73.
- Banan, N., Latif, M. T., Juneng, L., & Ahamad, F. (2013). Characteristics of Surface Ozone Concentrations at Stations with Different Backgrounds in the Malaysian Peninsula. *Aerosol and Air Quality Research*, 13(3), 1090-1106. <https://10.4209/aaqr.2012.09.0259>
- Carla, C. C., Rodrigo, A. C., Cáceres L, D., & Préndez B, M. (2016). Arbolado urbano, calidad del aire y afecciones respiratorias en seis comunas de la provincia de Santiago, Chile. *Revista Chilena De Enfermedades Respiratorias*, 32(2), 77-86. <https://10.4067/S0717-73482016000200003>
- Camilloni, I. (2007). El aire y el agua en nuestro planeta. Eudeba. <https://elibro-net.bibliotecavirtual.uis.edu.co/es/ereader/uis/101409?page=12>
- Castro Salazar, H. T. (2021). *Química ambiental básica*. Editorial CORHUILA. <https://elibro-net.bibliotecavirtual.uis.edu.co/en/ereader/uis/176264?page=92>

Chen, C. Julian. *Physics of Solar Energy*, John Wiley & Sons, Incorporated, 2011. ProQuest Ebook Central, <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliouis-ebooks/detail.action?docID=697580>.

Cotrozzi, L. (2021). The effects of tropospheric ozone on oaks: A global meta-analysis. *The Science of the Total Environment*, 756, 143795. <https://10.1016/j.scitotenv.2020.143795>

Cuesta-Mosquera, A. P., González-Duque, C. M., Velasco-García, M., & Aristizábal, B. H. (2018). DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CONCENTRACIONES DE SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> Y O<sub>3</sub> EN EL AIRE AMBIENTE DE MANIZALES. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*, 34(3), 489-504. <https://10.20937/rica.2018.34.03.11>

DANE. (2019). *Balance final del Censo Nacional de Población y Vivienda*. [www.funcionpublica.gov.co](http://www.funcionpublica.gov.co). <https://www.funcionpublica.gov.co/web/carta-administrativa/-/dane-revela-informe-completo-del-censo-de-poblacion#:~:text=Bogot%C3%A1%20D.C.%20apareci%C3%B3%20en%20el,el%20perio%20intercensal%202005%2D2018>.

David Galán Madruga, & Rosalía Fernández Patier. (2006). IMPLICACIÓN DE LOS NO<sup>x</sup> EN LA QUÍMICA ATMOSFÉRICA/IMPLICATION OF THE NO<sub>x</sub> IN THE ATMOSPHERIC CHEMISTRY. *M&#43;A : Revista Electrónica de Medioambiente*, (2), 90. Retrieved from <https://search.proquest.com/docview/218195853>

Doutora, P., Silva, C., Duarte De Sousa, J., & Neto, A. *Ozono troposférico em Lisboa -caso de estudo Entrecampos* UNIVERSIDADE DE LISBOA FACULDADE DE CIÊNCIAS DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA GEOFÍSICA E ENERGIA

- Dufour, G., Eremenko, M., Beekmann, M., Cuesta, J., Foret, G., Fortems-Cheiney, A., Lachâtre, M., Lin, W., Liu, Y., Xu, X., & Zhang, Y. (2018). Lower tropospheric ozone over the North China Plain: variability and trends revealed by IASI satellite observations for 2008–2016. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(22), 16439-16459. <https://10.5194/acp-18-16439-2018>
- European Environment Agency. (2016). *AIR AND HEALTH Sources of air pollution*. <https://www.eea.europa.eu/publications/2599XXX/page010.html#top>
- Gallego Pico, A. (2013). *Contaminacion atmosferica*. UNED - Universidad Nacional de Educacion a Distancia.
- Gobierno, S. (2017). *Carbono negro en la atmósfera*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/que-es-el-carbono-negro-134747>
- Herndon, S. C., Onasch, T. B., Wood, E. C., Kroll, J. H., Canagaratna, M. R., Jayne, J. T., Zavala, M. A., Knighton, W. B., Mazzoleni, C., Dubey, M. K., Ulbrich, I. M., Jimenez, J. L., Seila, R., de Gouw, J. A., de Foy, B., Fast, J., Molina, L. T., Kolb, C. E., & Worsnop, D. R. (2008). Correlation of secondary organic aerosol with odd oxygen in Mexico City. *Geophysical Research Letters*, 35(15), L15804-n/a. 10.1029/2008GL034058
- Ibáñez Cornejo, J. G., Doria Serrano, M. D. C., Fregoso Infante, A., Mohan Singh, M., Hernández Esparza, M.(2013). *Química ambiental*. McGraw-Hill. <http://www.ebooks7-24.com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/?il=390>.

IDEAM. (2021). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia 2019*. (). Bogotá: [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023898/InformeCalidadAire\\_2019.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023898/InformeCalidadAire_2019.pdf)

Jacob, D. J., Logan, J. A., & Murti, P. P. (1999). Effect of rising Asian emissions on surface ozone in the United States. *Geophysical Research Letters*, 26(14), 2175-2178. <https://10.1029/1999GL900450>

Jaramillo Ayerbe, M., González Gómez, D. E., Núñez Cabrera, M. E., Portilla, G. E., & Lucio García, J. H. (2007). Análisis de series de tiempo univariante aplicando metodología de Box-Jenkins para la predicción de ozono en la ciudad de Cali, Colombia. *Revista Facultad De Ingeniería Universidad De Antioquia*, (39), 79-88. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-62302007000100007&lng=en&tlng=en](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302007000100007&lng=en&tlng=en)

Ji, Y., Song, J., & Shen, P. (2022). A review of studies and modelling of solar radiation on human thermal comfort in outdoor environment. *Building and Environment*, 214, 1. [10.1016/j.buildenv.2022.108891](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.108891)

Liu, L., Zhuang, Q., Zhu, Q., Liu, S., van Asperen, H., & Pihlatie, M. (2018). Global soil consumption of atmospheric carbon monoxide: an analysis using a process-based biogeochemistry model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(11), 7913-7931. [10.5194/acp-18-7913-2018](https://doi.org/10.5194/acp-18-7913-2018)

Loera-Sánchez, J. M., Ramírez-Aldaba, H., Meléndez-Soto, A., García-Montiel, E., & González-Laredo, R. (2021). Aplicaciones geoestadísticas para la evaluación de la contaminación por

ozono en la ciudad de Durango, México. *Nova Scientia*, 13(27), 1.  
<https://10.21640/ns.v13i27.2804>

MANAHAN, S. E. (2007). INTRODUCCION A LA QUIMICA AMBIENTAL (1ed.). México Universidad Nacional Autónoma de México; Barcelona, p 402.

Malagón-Rojas, J., Mendez-Molano, D. :, Almentero, J. :, Toloza-Pérez, Y. G., Parra-Barrera, E. L., & Gómez-Rendón, C. P. (2022). *Environmental Effects of the COVID-19 Pandemic: The Experience of Bogotá, 2020*. MDPI AG. 10.3390/ijerph19106350

MAULDIN, R. L., BERNDT, T., SIPILÄ, M., PAASONEN, P., PETÄJÄ, T., KIM, S., KURTEN, T., STRATMANN, F., KERMINEN, V. -, & KULMALA, M. (2012). A new atmospherically relevant oxidant of sulphur dioxide. *NATURE*, Volume: 488, Issue: 7410, Pages: 193-, 488(7410), 193-196. 10.1038/nature11278

Mediavilla Pérez, M. J. (2005). La atmósfera: materia y radiación. Madrid, Spain: Equipo Sirius. Recuperado de <https://elibro-net.bibliotecavirtual.uis.edu.co/es/ereader/uis/35194?page=54>

Meng, K., Zhao, T., Xu, X., Zhang, Z., Bai, Y., Hu, Y., Zhao, Y., Zhang, X., & Xin, Y. (2022). Influence of stratosphere-to-troposphere transport on summertime surface O<sub>3</sub> changes in North China Plain in 2019. *Atmospheric Research*, 27610.1016/j.atmosres.2022.106271

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020). *Contaminación Atmosférica*. <https://www.minambiente.gov.co>. <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/contaminacion-atmosferica/#:~:text=La%20contaminaci%C3%B3n%20atmosf%C3%A9rica%20en%20Colombia,y%20de%20los%20desastres%20naturales>.

- Nisperuza, D., Rúa, A., Avendaño-Tamayo, E., Vásquez, L., & Grajales, H. (2021). Tropospheric O<sub>3</sub> Model from Climatological Approaches in the Colombian Andes. *The Professional Geographer*, 73(4), 775-784. <https://10.1080/00330124.2021.1922295>
- Obolkin, V., Molozhnikova, E., Shikhovtsev, M., Netsvetaeva, O., & Khodzher, T. (2021). Sulfur and Nitrogen Oxides in the Atmosphere of Lake Baikal: Sources, Automatic Monitoring, and Environmental Risks. *Atmosphere*, 12(10), 1348. 10.3390/atmos12101348
- Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá, (RMCAB). (2021). *Informe Anual de Calidad del Aire de Bogotá año 2020*. (). Bogotá:
- Rodríguez Santamaría, S. M. (2012). *Incidencia de síntomas respiratorios agudos en niños menores de 7 años y su asociación con niveles de ozono troposférico en la zona centro de Bucaramanga: Julio de 2007 a Junio de 2008*. Colombia: Universidad Industrial de Santander.
- Rosales Castillo José Alberto , Torres Meza Víctor Manuel , Fernández Olaiz Gustavo , Borja Aburto Víctor H. (2001). Los efectos agudos de la contaminación del aire en la salud de la población: evidencias de estudios epidemiológicos . *Salud Pública De México*, 43(6), 544-555.
- Rozbicka, K., Majewski, G., Rogula-Kozłowska, W., & Rozbicki, T. (2020). Tropospheric ozone assessment in urban environment – Warsaw case study of selected heat waves. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 209, 105418. <https://10.1016/j.jastp.2020.105418>
- Secretaria Distrital de Ambiente. (2020). *Inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos de Bogotá, 2018*.

- Spedding, D. J. (2017). Contaminación atmosférica. Editorial Reverté. <https://elibro-net.bibliotecavirtual.uis.edu.co/es/ereader/uis/183524?page=91>
- Stergiopoulou, A., Katavoutas, G., Samoli, E., Dimakopoulou, K., Papageorgiou, I., Karagianni, P., Flocas, H., & Katsouyanni, K. (2018). Assessing the associations of daily respiratory symptoms and lung function in schoolchildren using an Air Quality Index for ozone: Results from the RESPOZE panel study in Athens, Greece. *The Science of the Total Environment*, 633, 492-499. <https://10.1016/j.scitotenv.2018.03.159>
- Tian, Y., Li, X., Sun, H., Xue, W., & Song, J. (2022). Characteristics of atmospheric pollution and the impacts of environmental management over a megacity, northwestern China. *Urban Climate*, 42. <https://10.1016/j.uclim.2022.101114>.
- Thompson, R. D. (1998). *Atmospheric Processes and Systems*. Taylor & Francis Group.
- Velázquez de Castro González, Federico, & Jiménez Arcas, S. (2007). La contaminación por ozono troposférico. El caso de Motril (Granada). Retrieved from <http://revistas.ucm.es/index.php/OBMD/article/view/OBMD0707110265A>
- Verstraeten, W. W., Neu, J. L., Williams, J. E., Bowman, K. W., Worden, J. R., & Boersma, K. F. (2015). Rapid increases in tropospheric ozone production and export from China. *Nature Geoscience*, 8(9), 690-695. <https://10.1038/ngeo2493>
- Viatte, C., Gaubert, B., Eremenko, M., Hase, F., Schneider, M., Blumenstock, T., Ray, M., Chelin, P., Flaud, J. -, & Orphal, J. (2011). Tropospheric and total ozone columns over Paris (France) measured using medium-resolution ground-based solar-absorption Fourier-transform infrared spectroscopy. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, 4(3), 3337-3358. <https://10.5194/amtd-4-3337-2011>

- Wang, G., Iradukunda, Y., Shi, G., Sanga, P., Niu, X., & Wu, Z. (2021). Hydroxyl, hydroperoxyl free radicals determination methods in atmosphere and troposphere. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 99, 324-335. 10.1016/j.jes.2020.06.038
- Wedow, J. M., Ainsworth, E. A., & Li, S. (2021). Plant biochemistry influences tropospheric ozone formation, destruction, deposition, and response. *Trends in Biochemical Sciences (Amsterdam. Regular Ed.)*, <https://10.1016/j.tibs.2021.06.007>
- Wie, J., Moon, B., Yeh, S., Park, R. J., & Kim, B. (2021). La Niña-related tropospheric column ozone enhancement over East Asia. *Atmospheric Environment (1994)*, 261, 118575. <https://10.1016/j.atmosenv.2021.118575>
- Yiniva Camargo Caicedo, Tomás Rafael Bolaño Ortiz, & Antonio Álvarez Mancilla. (2010). Emisiones de compuestos orgánicos volátiles de origen biogénico y su contribución a la dinámica atmosférica. *Intropica*, 5, 77-86. <https://http://dx.doi.org/10.21676/23897864.155>
- Yuan, W., Huang, R., Yang, L., Ni, H., Wang, T., Cao, W., Duan, J., Guo, J., Huang, H., & Hoffmann, T. (2021). Concentrations, optical properties and sources of humic-like substances (HULIS) in fine particulate matter in Xi'an, Northwest China. *The Science of the Total Environment*, 789, 147902. 10.1016/j.scitotenv.2021.147902
- Zhao, P., Guo, M., Liu, Q., Fan, L., Han, J., Liu, C., Ji, N., Song, C., Ma, D., & Li, Z. (2019). Novel Mn Zr Cr O catalysts for low temperature NH<sub>3</sub>-SCR derived from high H<sub>2</sub>O content flue gas via natural gas combustion. *Chemical Engineering Journal (Lausanne, Switzerland : 1996)*, 378, 122100. 10.1016/j.cej.2019.122100

## Apéndices

### Apéndice A. Normatividad de calidad de aire en Colombia vs recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud.

Contaminante	Res. 2254/17		OMS			Tiempo de exposición
	A partir de 2018	A partir de 2030	Objetivo Intermedio 2	Objetivo Intermedio 3	Valor Guía	
PM <sub>10</sub>	50	30	50	30	20	Anual
	75	75	100	75	50	24 horas
PM <sub>2,5</sub>	25	15	25	15	10	Anual
	37	37	50	37,5	25	24 horas
SO <sub>2</sub>	50	20	-	-	-	24 horas
	100	-	-	-	-	1 hora
NO <sub>2</sub>	60	40	-	-	40	Anual
	200	-	-	-	-	1 hora
O <sub>3</sub>	100	-	-	-	100	8 horas
CO	5.000	-	-	-	-	8 horas
	35.000	-	-	-	-	1 hora

Valores expresados en µg/m<sup>3</sup>: microgramos por un metro cúbico de aire.

**Apéndice B. Estaciones de monitoreo de la RMCAB y variables monitoreadas – Año 2020.**

Características	Ubicación								Contaminantes						Variables Meteorológicas								
	Sigla	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Altura (m)	Localidad	Tipo de zona	Tipo de estación	Dirección	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	O <sub>3</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	V. Viento	D. Viento	Temperatura	Preoipitacion	R. Solar	H. Relativa	Presión Atm.	
Guaymaral	GYR	4°47'1.52"N	74°2'39.06"W	2580	0	Suba	Sub urbana	De fondo	Autopista Norte # 205-59	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X
Usaquén	USQ	4°42'37.26"N	74°1'49.50"W	2570	10	Usaquén	Urbana	De fondo	Carrera 7B Bis # 132-11	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X
Suba	SUB	4°45'40.49"N	74° 5'36.46"W	2571	6	Suba	Sub urbana	De fondo	Carrera 111 # 159A-61	X	X	X	X	X	X	X	X	X					X
Bolivia	BOL	4°44'9.12"N	74°7'33.18"W	2574	0	Engativá	Sub urbana	De fondo	Avenida Calle 80 # 121-98	X	X		X	X	X								
Las Ferías	LFR	4°41'26.52"N	74°4'56.94"W	2552	0	Engativá	Urbana	De tráfico	Avenida Calle 80 # 69Q-50	X	X	X	X	X		X	X	X	X		X	X	X
Centro de Alto Rendimiento	CDAR	4°39'30.48"N	74°5'2.28"W	2577	0	Barrios Unidos	Urbana	De fondo	Calle 63 # 59A-06	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Estación Móvil 7ma	MOV	4°38'32.75"N	74°5'2.28"W	2583	0	Chapinero	Urbana	De tráfico	Carrera 7 con calle 60	X	X			X		X	X	X	X	X	X	X	X
MinAmbiente	MAM	4°37'31.75"N	74°4'1.13"W	2621	15	Santa Fe	Urbana	De tráfico	Calle 37 # 8-40	X	X	X		X		X	X	X	X				
Fontibón	FTB	4°40'41.67"N	74°8'37.75"W	2551	11	Fontibón	Urbana	De tráfico	Carrera 104 # 20 C - 31	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X	
Puente Aranda	PTE	4°37'54.36"N	74°7'2.94"W	2590	10	Puente Aranda	Urbana	Industrial	Calle 10 # 65-28	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
Kennedy	KEN	4°37'30.18"N	74°9'40.80"W	2580	3	Kennedy	Urbana	De fondo	Carrera 80 # 40-55 sur	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Carvajal - Sevillana	CSE	4°35'44.22"N	74°8'54.90"W	2563	3	Kennedy	Urbana	Tráfico / Industrial	Autopista Sur # 63-40	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
Tunal	TUN	4°34'34.41"N	74°7'51.44"W	2589	0	Tunjuelito	Urbana	De fondo	Carrera 24 # 49-86 sur	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
San Cristóbal	SCR	4°34'21.19"N	74°5'1.73"W	2688	0	San Cristóbal	Urbana	De fondo	Carrera 2 Este # 12-78 sur	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	
El Jazmín	JAZ	4°36'30.6"N	74°06'53.8"W	2559	0	Puente Aranda	Urbana	Residencial	Calle 1 G # 41 A 39	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Usme	USM	4°31'55.4"N	74°07'01.7"W	2593	0	Usme	Urbana	Residencial	Carrera 11 # 65 D 50 Sur	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Bosa	BOS	4°36'20.2"N	74°12'14.6"W	2546	0	Bosa	Urbana	De fondo	Diagonal 73 F Sur # 78 - 44	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Ciudad Bolívar	CBV	4°34'40.1"N	74°09'58.6"W	2661	0	Ciudad Bolívar	Urbana	Residencial	Calle 70 Sur # 56 - 11	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X

