



**Concentración de O<sub>3</sub> troposférico en el Valle de Aburrá a partir del análisis de mediciones in- situ y satelitales**

Leidy Karina Vásquez Londoño

**DIRECTOR:**

Dr. Daniel José Nisperuza Toledo

Tecnológico de Antioquia  
Institución Universitaria  
Ingeniería Ambiental

Medellín, Colombia.

2019

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por abrirme el camino a la experiencia de la investigación, por darme sabiduría, salud y por no dejarme desfallecer a tan duras pruebas durante la realización de este trabajo.

A mi profesor y asesor de trabajo de grado, Daniel José Nisperuza, por el apoyo, por su paciencia y por su gran disposición para explicarme y orientarme, gracias por tan valiosas enseñanzas.

A mi familia especialmente a mi madre Sandra Londoño por su apoyo incondicional, por su amor y por creer siempre en mí.

## TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS .....	5
ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ABREVIATURAS.....	8
RESUMEN .....	10
ABSTRACT .....	11
OBJETIVOS .....	12
Objetivo General.....	12
Objetivos Específico .....	12
INTRODUCCIÓN .....	13
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	14
Capítulo 1 .....	16
1.1. Generalidades sobre la composición atmosférica y el ozono troposférico..	16
1.2. Ozono troposférico.....	18
Capítulo 2.....	21
2.1. Técnicas de cuantificación del O <sub>3</sub> troposférico .....	21
2.2. Monitoreo in-situ de O <sub>3</sub> en el Valle de Aburrá.....	22
2.3. Monitoreo remoto del O <sub>3</sub> en el Valle de Aburrá.....	24
2.4. El Instrumento de Monitoreo de Ozono - OMI.....	26
Capítulo 3.....	32
3.1 Región de estudio .....	32
3.2 Adquisición y tabulación de datos.....	33
3.2.1. <i>Distribución espacio-temporal del O<sub>3</sub> troposférico en el Valle de Aburrá</i> .....	34
3.2.2. <i>Correlación entre el ozono en columna atmosférica y la concentración de ozono en superficie</i> .....	40
3.2.3. <i>Modelo de ozono troposférico a partir de parámetros meteorológicos.</i>	45
Capítulo 4.....	55
4.1. Resultados y Discusión.....	55
Capítulo 5.....	64

5.1. Conclusiones .....	64
5.2. Perspectivas .....	66
REFERENCIAS .....	67
ANEXOS .....	71

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1. CAPAS DE LA ATMÓSFERA TERRESTRE DE ACUERDO AL PERFIL VERTICAL DE TEMPERATURA. ADAPTADO DE (WALLACE & HOBBS, 2006) .	17
FIGURA 2.1 . CONCENTRACIÓN DE O <sub>3</sub> EN SUPERFICIE EN EL VALLE DE ABURRÁ REPORTADO POR SIATA. EJEMPLO TOMADO PARA LA ESTACIÓN 3 UBICADA EN EL MUNICIPIO DE GIRARDOTA, EL 26-03-2019. IMAGEN TOMADA DE <a href="https://siata.gov.co">HTTPS://SIATA.GOV.CO</a>	23
FIGURA 2.2. FORMACIÓN DE LA CONSTELACIÓN DE SATÉLITES A-TRAIN DE NASA. IMAGEN TOMADA DE <a href="https://www.nasa.gov/mission_pages/a-train/a-train.html">HTTPS://WWW.NASA.GOV/MISSION_PAGES/A-TRAIN/A-TRAIN.HTML</a> .	25
FIGURA 2.3. REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA ÓRBITA POLAR QUE DESCRIBE EL SATÉLITE AURA.	25
FIGURA 2.4. BARRIDO Y TAMAÑO PROMEDIO DE PIXEL EN LA SUPERFICIE TERRESTRE DETECTADO POR EL INSTRUMENTO OMI.	27
FIGURA 2.5. ESQUEMATIZACIÓN DE PRINCIPIO DE TELEDETECCIÓN DE UN DOAS. IZQUIERDA: PARA UN SISTEMA ANCLADO EN LA SUPERFICIE DE LA TIERRA. DERECHA: PARA UN SISTEMA A BORDO DE UN SATÉLITE, COMO POR EJEMPLO OMI A BORDO DE DEL SATÉLITE AURA ..	28
FIGURA 2.6. EJEMPLO DE PERFIL VERTICAL DE OZONO OBTENIDO DE LOS PRODUCTOS L2 REPORTADOS POR EL INSTRUMENTO OMI A BORDO DEL SATÉLITE AURA – NASA. IMAGEN TOMADA DE: <a href="https://daac.gsfc.nasa.gov/datasets/omo3pr_v003/summary?keywords=o3">HTTPS://DAAC.GSFC.NASA.GOV/DATASETS/OMO3PR_V003/SUMMARY?KEYWORDS=O3</a>	31
FIGURA 3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA DEL VALLE DE ABURRÁ EN LOS ANDES COLOMBIANOS. IMAGEN TOMADA DE <a href="https://www.metropol.gov.co/planeacion">HTTPS://WWW.METROPOL.GOV.CO/PLANEACION</a>	32
FIGURA 3.2. PROMEDIOS DIARIOS DE CONCENTRACIÓN DE O <sub>3</sub> EN SUPERFICIE EN CADA UNA DE LAS ESTACIONES SIATA.	35
FIGURA 3.3. CURVA PROMEDIO DE TODAS LAS ESTACIONES SIATA QUE MIDEN LA CONCENTRACIÓN DE OZONO EN SUPERFICIE	35
FIGURA 3.4. PERFIL TÍPICO DE O <sub>3</sub> EN COLUMNA ATMOSFÉRICA EN EL VALLE DE ABURRA. MEDIDO POR EL INSTRUMENTO OMI EL 01/01/2010.	36
FIGURA 3.5.. ALTURAS DE LOS MÁXIMOS RELATIVOS DE O <sub>3</sub> TROPOSFÉRICO, OBTENIDO DEL INSTRUMENTO OMI A BORDO DEL SATÉLITE AURA, RESPECTO A LA UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS DIFERENTES ESTACIONES SIATA QUE CUANTIFICAN O <sub>3</sub> EN SUPERFICIE.	37
FIGURA 3.6. CURVA PROMEDIO PARA LAS ALTURAS DE LOS MÁXIMOS RELATIVAS DE O <sub>3</sub> TROPOSFÉRICO. LA LÍNEA ROJA REPRESENTA LA ALTURA PROMEDIO (7,23 KM) ALREDEDOR DE LA CUAL OSCILAN ESTOS MÁXIMOS.	38
FIGURA 3.7. MÁXIMO RELATIVO DE O <sub>3</sub> TROPOSFÉRICO OBTENIDO DEL INSTRUMENTO OMI A BORDO DEL SATÉLITE AURA, RESPECTO A LA UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LAS DIFERENTES ESTACIONES SIATA QUE CUANTIFICAN O <sub>3</sub> EN SUPERFICIE.	38
FIGURA 3.8. CURVA PROMEDIO PARA LOS MÁXIMOS DE O <sub>3</sub> TROPOSFÉRICOS EN LOS PERFILES VERTICALES DE ESTE GAS TRAZA SOBRE EL VALLE DE ABURRÁ.	39
FIGURA 3.9. CONTENIDO TOTAL PROMEDIO DE OZONO EN COLUMNA ATMOSFÉRICA TROPOSFÉRICA	39
FIGURA 3.10. TENDENCIA ANUAL DEL OZONO TROPOSFÉRICO MEDIDO IN-SITU Y SATELITALMENTE PARA LOS AÑOS 2012 A 2018.	41
FIGURA 3.11. CORRELACIÓN LINEAL DE PROMEDIOS DIARIOS DE OZONO TROPOSFÉRICO MEDIDO EN SUPERFICIE Y OZONO TROPOSFÉRICO MEDIDO POR EL INSTRUMENTO OMI A BORDO DEL SATÉLITE AURA, PARA LOS AÑOS 2012 A 2018.	42
FIGURA 3.12. TENDENCIA ANUAL DEL OZONO TROPOSFÉRICO RESPECTO A LOS PROMEDIOS MENSUALES MEDIDO IN-SITU Y SATELITALMENTE PARA LOS AÑOS 2012 A 2018.	43
FIGURA 3.13. CORRELACIÓN ENTRE PROMEDIOS MENSUALES DE OZONO TROPOSFÉRICO IN-SITU Y REMOTO PARA LOS AÑOS 2012 A 2018. LADO IZQUIERDO: CORRELACIÓN LINEAL PARA TODOS LOS MESES;	

LADO DERECHO: CORRELACIÓN LINEAL SIN LOS DATOS PARA LOS MESES DE MAYOR NUBOSIDAD. (3.13).....	44
FIGURA 3.14. TENDENCIAS SINUSOIDALES DEL O <sub>3</sub> EN SUPERFICIE PARA LOS AÑOS 2012 AL 2018. ....	46
FIGURA 3.15. PROMEDIOS DIARIOS Y CURVA PROMEDIO DE HUMEDAD RELATIVA (HR) EN CADA UNA DE LAS ESTACIONES QUE MONITOREAN DICHO PARÁMETRO DESDE EL AÑO 2012 AL 2018. ....	49
FIGURA 3.16. PROMEDIOS DIARIOS Y CURVA PROMEDIO DE TEMPERATURA (T) EN CADA UNA DE LAS ESTACIONES QUE MONITOREAN DICHO PARÁMETRO DESDE EL AÑO 2012 AL 2018. ....	50
FIGURA 3.17. PROMEDIOS DIARIOS Y CURVA PROMEDIO DE LA RAPIDEZ DEL VIENTO (V) EN CADA UNA DE LAS ESTACIONES QUE MONITOREAN DICHO PARÁMETRO DESDE EL AÑO 2012 AL 2018. ....	50
FIGURA 3.18. PROMEDIOS DIARIOS Y CURVA PROMEDIO DE RADIACIÓN TOTAL EN SUPERFICIE (I) EN CADA UNA DE LAS ESTACIONES QUE MONITOREAN DICHO PARÁMETRO DESDE EL AÑO 2012 AL 2018. ....	51
FIGURA 3.19. CORRELACIONES ENTRE LA CONCENTRACIÓN DIARIA DE OZONO EN SUPERFICIE Y LOS PROMEDIOS DIARIOS DE PARÁMETROS METEOROLÓGICOS: %HR, T, V E I. ....	52
FIGURA 3.20. CORRELACIONES ENTRE LA CONCENTRACIÓN MENSUAL DE OZONO EN SUPERFICIE Y LOS PROMEDIOS MENSUALES DE PARÁMETROS METEOROLÓGICOS: %HR, T, V E I. ....	53
FIGURA 4.1. TENDENCIA SINUSOIDAL DEL OZONO TROPOSFÉRICO MEDIDO EN SUPERFICIE. ....	56
FIGURA 4.2. MODELOS EVALUADOS PARA LOS PROMEDIOS DIARIOS .....	61
FIGURA 4.3. MODELOS EVALUADOS PARA LOS PROMEDIOS MENSUALES.....	61
FIGURA 4.4. COMPARACIÓN ENTRE MODELOS PARA LA TENDENCIA DEL O <sub>3</sub> EN EL VALLE DE ABURRÁ. ARRIBA: PARA LOS PROMEDIOS DIARIOS; ABAJO: MODELOS EVALUADOS PARA LOS PROMEDIOS MENSUALES. ....	62

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1. TAMAÑO Y CONCENTRACIONES DE ALGUNAS PARTÍCULAS EN LA ATMÓSFERA TERRESTRE (KOVALEV V, 2004) .....	16
TABLA 1.2. TAMAÑO Y CONCENTRACIONES DE ALGUNAS PARTÍCULAS EN LA ATMÓSFERA TERRESTRE (KOVALEV V, 2004) .....	17
TABLA 2.1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL INSTRUMENTO OMI. INFORMACIÓN TOMADA DE <a href="https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.html">HTTPS://AURA.GSFC.NASA.GOV/OMI.HTML</a> .....	27
TABLA 2.2. NIVELES DE PROCESAMIENTO DE DATOS Y PRODUCTOS ASOCIADOS AL O <sub>3</sub> A PARTIR DEL INSTRUMENTO OMI A BORDO DEL SATÉLITE AURA DE NASA. ....	30
TABLA 3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE ARCHIVOS IN-SITU Y SATELITALES (OMI TEAM , 2012) (SIATA, 2018) .....	33
TABLA 3.2. ESTACIONES DE LA RED DE CALIDAD DEL AIRE DE SIATA QUE MIDEN OZONO EN EL VALLE DE ABURRÁ (SIATA, 2018). ....	34
TABLA 3.3. GENERALIDADES DE LAS CURVAS DE TENDENCIA DEL OZONO EN SUPERFICIE PARA LOS AÑOS 2012 AL 2018 .....	47
TABLA 3.4. GENERALIDADES DE LAS CURVAS DE TENDENCIA DEL OZONO EN SUPERFICIE PARA LOS AÑOS 2012 AL 2018. ....	48
TABLA 3.5. RESUMEN GENERAL DE LAS CORRELACIONES ENTRE EL OZONO EN SUPERFICIE Y LOS PARÁMETROS METEOROLÓGICOS. ....	54
TABLA 4.1. VALORES PROMEDIOS PARA LA DISTRIBUCIÓN HORIZONTAL DE OZONO EN LA ZONA URBANA DEL VALLE DE ABURRÁ. ....	55
TABLA 4.2. TENDENCIAS PROMEDIAS EN LA OSCILACIÓN DINÁMICA DEL O <sub>3</sub> TROPOSFÉRICO EN EL VALLE DE ABURRÁ, DESDE EL AÑO 2012 AL AÑO 2018 .....	57
TABLA 4.3. GENERALIDADES DE RESULTADOS DE CORRELACIÓN DE PROMEDIOS DIARIOS Y MENSUALES DE OZONO TROPOSFÉRICO MEDIDO DE MANERA IN-SITU Y REMOTA. ....	58
TABLA 4.4. RESULTADOS DE CORRELACIÓN ENTRE OZONO EN SUPERFICIE Y ALGUNOS PARÁMETROS METEOROLÓGICOS. ....	59
TABLA 4.5. MODELOS DE PRIMERA APROXIMACIÓN PARA LA TENDENCIA DEL O <sub>3</sub> EN SUPERFICIE EN LA ZONA URBANA DEL VALLE DE ABURRÁ. ....	60
TABLA 4.6. ERRORES RELATIVOS ASOCIADOS A LAS APROXIMACIONES EN CADA MODELO PROPUESTO PARA EL CONTENIDO DE O <sub>3</sub> EN SUPERFICIE EN LA ZONA URBANA DEL VALLE DE ABURRÁ. ....	63

## **ABREVIATURAS**

AMVA: Área Metropolitana del Valle de Aburrá

A – Train: Constelación de satélites de la tarde

DOAS: Espectroscopia de Absorción Óptica Diferencial

EOS: Sistema de observación de la Tierra

HIRDLS: La Sonda Dinámica de Alta Resolución

$h\nu$  : Energía de un fotón

LIDAR: Detección por luz y distancia

MLS: La Sonda de Microwave Limb

NASA: Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio

OMI: Instrumento de Monitoreo de Ozono

SIATA: Sistema de Alertas Tempranas del valle de Aburrá

SVCA: Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire

TES: Espectrómetro de Emisión Troposférica

UTC: Tiempo universal coordinado

### **Unidades de medida en el S.I.**

nm: nanómetros

ppb: Partes por billón

ppm: Partes por millón

UD: Unidad Dobson

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ : Microgramos por metro cúbico

## Elementos químicos

Br: Bromo

CO: Monóxido de Carbono

CO<sub>2</sub>: Dióxido de carbono

COV: Compuestos Orgánicos Volátiles

CH<sub>4</sub>: Metano

H<sub>2</sub>O: Agua

NO<sub>x</sub>: Óxidos de nitrógeno

O(<sup>1</sup>D) : Singlete

O<sub>2</sub>: Oxígeno molecular

O<sub>3</sub> Ozono

OH: Radical Hidroxilo

SO<sub>2</sub>: Dióxido de azufre

## RESUMEN

En este trabajo se realizó un estudio del contenido del ozono en la troposfera del área urbana del Valle de Aburrá, mediante mediciones remotas e in-situ, en el periodo comprendido entre junio de 2012 a julio de 2018. Se describió la dinámica espacio temporal que este gas traza exhibe en este estrato de atmósfera a partir del análisis de los perfiles de ozono obtenidos por el instrumento OMI, a bordo del satélite Aura de la NASA, y de su concentración cuantificada por las diversas estaciones SIATA, estratégicamente posicionadas en la superficie de este Valle. El análisis de las tendencias observadas para este gas, desde perspectivas matemáticas y fenomenológicas, que involucraron correlaciones entre el contenido de este gas en superficie con lo cuantificado del mismo desde satélite y algunos parámetros meteorológicos como la humedad relativa, la temperatura, la rapidez del viento y la intensidad de radiación en superficie, conllevó a la estructuración de algunos modelos simples que permiten describir adecuadamente la tendencia del ozono en la zona urbana del Valle de Aburrá en el tiempo.

Palabras claves: Ozono, medición in-situ, medición remota, modelación de ozono.

## **ABSTRACT**

In this work a study of the ozone content in the troposphere of the urban area of the Aburrá Valley was carried out, through remote measurements and in-situ, in the period from June 2012 to July 2018. It was described the temporal space dynamics that this trace gas exhibits in this stratum of atmosphere from the analysis of the ozone profiles obtained by the OMI instrument, aboard NASA's Aura satellite, and its concentration quantified by the various SIATA stations, strategically positioned on the surface of this valley. The analysis of the observed trends for this gas, from mathematical and phenomenological perspectives, involving correlations between the content of this gas on the surface with the quantified thereof from satellite and some meteorological parameters such as relative humidity, temperature, wind speed and the intensity of surface radiation, let structuring of some simple models that allow to adequately describe the ozone trend in the urban area of the Aburrá valley over time.

Key words: Ozone, in-situ measurement, remote measurement, ozone modeling.

# OBJETIVOS

## Objetivo General

Analizar la concentración del O<sub>3</sub> troposférico en la zona urbana del Valle de Aburrá a partir de mediciones in-situ registradas por SIATA y remotas disponibles en las plataformas satelitales de NASA.

## Objetivos Específico

- Describir la evolución espacio-temporal del O<sub>3</sub> en la troposfera del Valle de Aburrá a partir de los perfiles verticales del contenido de este gas traza, derivados de las mediciones del instrumento OMI a bordo del satélite AURA de NASA.
- Relacionar la cantidad de O<sub>3</sub> en columna troposférica medida por el instrumento OMI a bordo del satélite AURA de NASA con la concentración de ozono en superficie registrada en las diferentes estaciones de calidad del aire de SIATA, en la zona urbana del Valle de Aburrá.
- Establecer un modelo matemático simple para la concentración de O<sub>3</sub> en superficie como una función de parámetros meteorológicos registrados en las diferentes estaciones de calidad del aire de SIATA, en la zona urbana del Valle de Aburrá.

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo ha sido enmarcado dentro de las actividades de investigación que se llevan a cabo en el semillero “Las Ciencias Básicas y Áreas Comunes de Cara a los Retos Ambientales Actuales” del grupo de investigación CBATA en el Tecnológico de Antioquia - Institución Universitaria. Actividades que se centran en la apropiación, desarrollo e implementación de las técnicas de teledetección orientadas a estudios atmosféricos, las cuales han demostrado ser una herramienta útil para el monitoreo, análisis y diagnóstico de parámetros y variables relacionadas con la calidad del aire.

Consecuentemente, en plena conciencia de los retos que actualmente se enfrentan en la zona urbana del Valle de Aburrá, en cuanto al control y monitoreo de la calidad del aire que respiran sus habitantes, se realizó en este trabajo un estudio de la concentración del O<sub>3</sub> troposférico en esta región, a partir del análisis de mediciones in- situ registradas por SIATA (Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá) y remotas disponibles en las plataformas satelitales de NASA (por sus siglas en inglés *National Aeronautics and Space Administration*).

Este trabajo está estructurado de forma secuencial, reportando en el capítulo 1, el marco general de los procesos físicos y químicos involucrados en la formación del ozono en la troposfera. En el capítulo 2, se hace una descripción detallada de las principales técnicas de cuantificación del ozono tanto in-situ como remotamente, haciendo énfasis en las mediciones reportadas por SIATA y aquellas disponibles en las plataformas satelitales de NASA. En el capítulo 3, se describen los procesos metodológicos seguidos para la tabulación y el análisis de la información obtenida desde SIATA y NASA. En el capítulo 4, se reportan los resultados más relevantes encontrados en esta investigación. Finalmente, en el capítulo 5, el lector podrá acceder a las principales conclusiones, implicaciones, alcances y perspectivas de este trabajo.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las constantes emisiones de sustancias contaminantes en nuestra biosfera han conllevado a un significativo deterioro de los ecosistemas, lo cual ha traído como consecuencia un continuo cambio en la climatología global (Botero, 2015). La biodiversidad colombiana se muestra susceptible a la rapidez con la que estos cambios se están presentando (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014). Los crecientes episodios de extrema contaminación atmosférica, especialmente en zonas densamente pobladas -afectadas por sustancias químicas y material particulado producto de la actividad industrial y las emisiones vehiculares- contribuyen de manera directa al desmejoramiento de los ambientes en nuestro territorio (Botero, 2015); evidenciándose en la afectación de los climas locales, la producción agrícola, la salud humana, el patrimonio estructural, la calidad del aire, entre otros (FAO , 1997).

En estas zonas resulta pertinente estudiar y comprender no sólo la información físico-química de los componentes atmosféricos, sino, establecer criterios de evaluación y control que deben involucrarse necesariamente en la definición de las políticas ambientales. El Valle de Aburrá, ubicado en la región Andina noroccidental colombiana, está afectado por una amplia variedad de fuentes de contaminantes tanto naturales como antropogénicos y un creciente registro de casos de extrema contaminación (Bedoya & Elkin , 2018), por lo que el estudio de su atmósfera contribuye a la obtención de datos científicos relevantes en la implementación de políticas de prevención y control en salud pública y calidad del aire. Uno de los componentes atmosféricos que desempeña un importante papel en estos temas es el ozono ( $O_3$ ) troposférico, el cual es considerado como un gas traza contaminante (Ramon & Ramon, 2015). Su actual monitoreo en esta región se realiza in-situ desde estaciones posicionadas en superficie, proporcionando una imagen parcial de los diversos procesos que este lleva a cabo al interactuar con la múltiple variedad de constituyentes en las diferentes capas atmosféricas (Ramon & Ramon, 2015). La información que se puede obtener de este gas a partir de las técnicas de teledetección (Romero, 2006), han sido poco exploradas en nuestro territorio, debido a factores como el desconocimiento de los principios científicos involucrados en las mismas, la mala interpretación de los datos que estas técnicas proporcionan, la inexperiencia al acceso de dichos datos y la poca claridad en la correlación que estos puedan tener con las mediciones in-situ (Wallace & Hobbs, 2006).

De esta manera, se propuso en este trabajo un estudio de la concentración de  $O_3$  troposférico en el Valle de Aburrá a partir del análisis de mediciones in- situ registradas por SIATA y remotas disponibles en las plataformas satelitales de NASA; esperando que los resultados obtenidos contribuyan a un mejor

entendimiento del efecto que este gas traza tiene en la calidad del aire local; y a futuro, sean incluidos en los modelos regionales y globales de cambio climático.

# Capítulo 1

## 1.1. Generalidades sobre la composición atmosférica y el ozono troposférico

La atmósfera terrestre es una delgada capa gaseosa que rodea a la tierra, con el 99% de su masa distribuida en sus primeros 30 km de altura. Su composición es heterogénea entre gases y partículas en suspensión (Platt & Stutz, 2008). La atmósfera, está compuesta principalmente por nitrógeno (N<sub>2</sub>) y oxígeno (O<sub>2</sub>) molecular, con pequeñas cantidades de otros gases, como vapor de agua (H<sub>2</sub>O) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>); además de otros en menor proporción que afectan el clima y la calidad del aire. Los más importantes son: el ozono (O<sub>3</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y los clorofluorocarbonos, entre otros. La tabla 1.1. y la tabla 1.2. listan los principales constituyentes de la atmósfera terrestre y su concentración promedio.

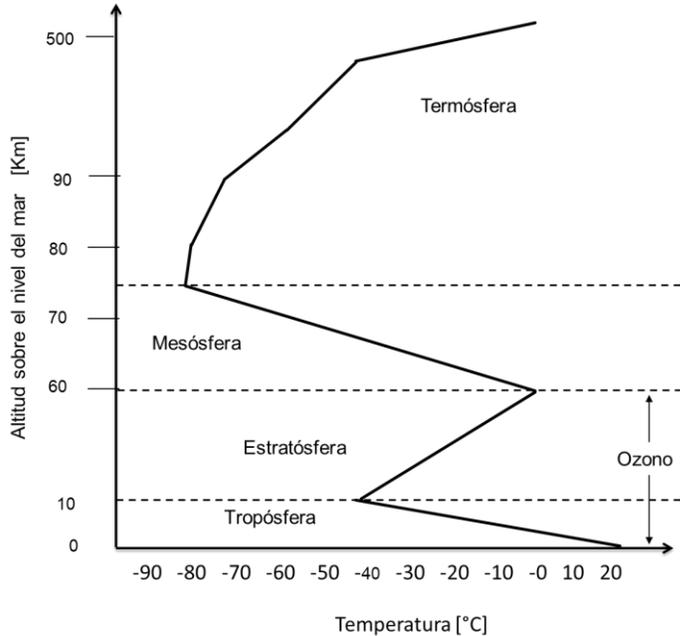
**Tabla 1.1.** Tamaño y concentraciones de algunas partículas en la atmósfera terrestre (Kovalev V, 2004)

Gas	Concentración	
	ppm	µg/m <sup>3</sup>
Nitrógeno	756.500	8,67 x 10 <sup>8</sup>
Oxígeno	202.900	2,65 x 10 <sup>8</sup>
Agua	31.200	2,30 x 10 <sup>7</sup>
Argón	9.000	1,47 x 10 <sup>7</sup>
Dióxido de Carbono	305	5,49 x 10 <sup>7</sup>
Neón	17,4	1,44 x 10 <sup>4</sup>
Helio	5,0	8,25 x 10 <sup>2</sup>
Metano	1,16	7,63 x 10 <sup>2</sup>
Kriptón	0,97	3,32 x 10 <sup>3</sup>
Óxidos Nitrosos	0,49	8,73 x 10 <sup>2</sup>
Hidrógeno	0,49	4,00 x 10 <sup>1</sup>
Xenón	0,08	4,17 x 10 <sup>2</sup>
Vapores Orgánicos	0,02	--

**Tabla 1.2.** Tamaño y concentraciones de algunas partículas en la atmósfera terrestre (Kovalev V, 2004)

Partícula	Tamaño $\mu m$		Concentración $\mu g/cm^3$	
	Desde	Hasta	Desde	Hasta
Gotas de Agua	$10^2$	$10^4$	$10^{-5}$	$10^{-2}$
Aerosoles	$10^{-2}$	$10^2$	10	$10^3$

De acuerdo al perfil vertical de la temperatura en la atmósfera terrestre, esta se puede dividir en diferentes estratos o capas: troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera son las principales desde la superficie de la tierra hasta el tope de la misma. La figura 1.1 muestra el comportamiento típico de la temperatura en estos estratos.



**Figura 1.1** Capas de la atmósfera terrestre de acuerdo al perfil vertical de temperatura. Adaptado de (Wallace & Hobbs, 2006).

La troposfera es la capa más cercana a la superficie de la tierra, extendiéndose en promedio hasta unos 10 km de altura sobre el nivel del mar para las regiones cerca del Ecuador (Lusi, 2017). En esta capa se concentra, aproximadamente, el 80% de toda la masa de la atmósfera y ocurren los fenómenos meteorológicos más relevantes (Lacounture, 1979). Este estrato se encuentra directamente influenciado por la actividad humana en la superficie de la tierra, cuyo desarrollo socio-cultural e industrial ha conllevado a un incremento en la producción de sustancias

contaminantes, causando un significativo deterioro de esta capa. En la troposfera se desarrollan complejos procesos físico-químicos entre estas partículas y los gases presentes en ella (Spedding, García, & Gutiérrez, 2002) Estos procesos se hacen más evidentes en zonas urbanas, donde puede encontrarse en suspensión una mezcla de gases como el dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y monóxidos de carbono, entre otros (Lacounture, 1979) regulando la calidad del aire en estas zonas.

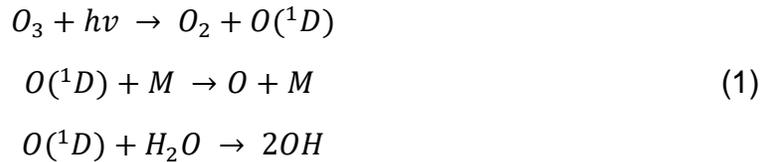
Situaciones de extrema contaminación suelen presentarse bajo condiciones de estabilidad atmosférica, donde los movimientos convectivos verticales de masas de aire se encuentran restringidos, dando lugar a concentración de humedad, nieblas persistentes entre otras características propias del fenómeno de la inversión térmica (Arango;Tobón; & Mejía, 2011). En valles montañosos, como el Valle de Aburrá, estas condiciones meteorológicas suelen ser frecuentes por lo que los procesos fotoquímicos desencadenados en ellas conllevan a un deterioro de la calidad del aire. Uno de los constituyentes atmosféricos frecuentemente asociado a este deterioro es el ozono troposférico, el cual es catalogado como un contaminante debido a que se comporta como un gas de efecto invernadero, contribuyendo al calentamiento global (Hartmann, 2013). Sus efectos repercuten sobre la salud humana, la vegetación, la biodiversidad e incluso sobre la infraestructura física de obras civiles y monumentos (Borsese & Esteban, 2005).

## **1.2. Ozono troposférico**

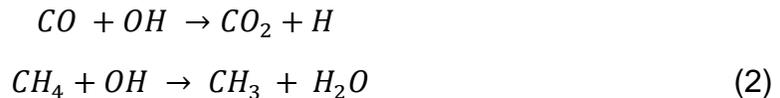
En una atmósfera sin intervención antrópica, la formación del ozono troposférico está ligada al ciclo del carbono presente en los compuestos orgánicos volátiles (COV), mediante un proceso de oxidación de estos con los radicales hidroxilos presentes en la atmósfera (Arango; Tobón; & Mejía, 2011). Por otro lado, en una atmósfera urbana donde la intervención antrópica juega un papel importante en la producción de contaminantes, los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) desempeñan un papel como catalizadores en el complejo proceso de formación del ozono troposférico (Spedding, García, & Gutiérrez, 2002) (Hartmann, 2013) (Grajales, 2011).

Los radicales libres involucrados en la formación del ozono en la troposfera, tienen diferentes mecanismos de formación, uno de ellos es, cuando las moléculas de ozono estratosféricas logran ingresar a la tropósfera, como se muestra en las reacciones expresadas en la ecuación (1), en la cual, la molécula de  $\text{O}_3$  interactúa con un fotón ( $h\nu$ ) para producir una molécula de oxígeno ( $\text{O}_2$ ) más un singlete  $\text{O}(^1D)$  (un átomo de oxígeno en un estado excitado). Este singlete tiene la capacidad de

interactuar tanto con una molécula inerte (M) como con una de agua ( $H_2O$ ). En esta última interacción se generan los radicales hidroxilos (OH).



Ahora, los COV presentes en la atmósfera, entre ellos el CO y el  $CH_4$ , interactúan con los radicales libres expresados en la ecuación (1) en un proceso de oxidación. La ecuación (2) sintetiza este proceso:



De la ecuación (2), en el proceso de oxidación del CO se forman átomos de H, los cuales interactúan fácilmente con  $O_2$  para generar radicales libres  $HO_2$ , como se muestra en la ecuación (3):



Los radicales  $HO_2$  producidos en la reacción de la ecuación (3), tienen la capacidad de interactuar entre ellos mismos para producir peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) como se establece en la ecuación (4):



Por su parte, el peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) en la reacción de la ecuación (4), al ser fotolizado produce más radicales OH y al interactuar con otros radicales OH presentes en la atmósfera propicia la generación de más radicales libres  $HO_2$  y agua, como se muestra en las ecuaciones (5):



En presencia de NO, estos radicales  $HO_2$  generan nuevos radicales libres OH y  $NO_2$ , como se describe en la ecuación (6):



El  $NO_2$  producido de esta manera, al interactuar con luz (en presencia de  $O_2$ ) genera NO y  $O_3$ . Tal como se describe en la ecuación (7):



El ozono generado de esta manera en la troposfera llega a alcanzar una vida media de semanas y puede transportarse a grandes distancias dependiendo de las condiciones meteorológicas. Es por esto que sus concentraciones en un determinado lugar pueden ser el resultado de la mezcla entre el ozono generado de emisiones locales y aquellos emitidos en zonas lejanas o de otros países e incluso continentes (MARM; CIEMAT, 2007)

## Capítulo 2

### 2.1. Técnicas de cuantificación del O<sub>3</sub> troposférico

Durante las últimas décadas el estudio y monitoreo de los diferentes constituyentes atmosféricos producidos natural y antropogénicamente, involucrados de manera directa e indirecta en la calidad del aire y las características meteorológicas de una región, tales como CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, aerosoles y gases contaminantes, entre otros, ha propiciado la generación de nuevos conocimientos relacionados con la dinámica físico-química que estos suelen tener y su influencia en los ecosistemas (Ataz & Morales, 2004). De la mano se ha tenido un creciente desarrollo tecnológico que ha permitido la generación y adaptación de tecnologías avanzadas para la cuantificación de diversos parámetros atmosféricos y meteorológicos tanto de forma remota como in-situ (Denore & García, 1999).

Toda medición in-situ requiere de la toma directa y análisis de una muestra del sistema a estudiar, mientras que una medición remota adquiere dicha información sin entrar en contacto directo con él.

Los métodos de medidas in-situ más utilizados para cuantificar el ozono se listan a continuación (Cisneros, 1990):

- *Papel ozonoscópico.*  
La concentración de ozono es obtenida mediante la utilización de un filtro con solución de yoduro potásico, almidonado y secado, donde el ozono al entrar en contacto toma un color azul.
  
- *Decoloración de la tintura de índigo.*  
Con esta técnica se puede cuantificar concentraciones muy bajas de ozono. Se utiliza tintura de índigo y arena de diatomáceas en un tubo calibrado, donde la tintura de índigo es impregnada en el tubo con la arena pasando de color azul a blanco cuando se hace pasar una muestra de aire a través del tubo.
  
- *Quimioluminiscencia.*  
La concentración de ozono es obtenida por medio de la luminiscencia de sustancias como el etileno y la rodamina B en contacto con el ozono.

- *Absorción fotométrica.*  
La concentración de ozono se calcula en una muestra de aire por medio de la capacidad que tiene el ozono de absorber la radiación ultravioleta.
- *Sonda electroquímica.*  
Esta medida obtiene la distribución vertical de la concentración de ozono en la atmósfera, donde su principio de medición tiene lugar en la oxidación del yodo contenido en una sonda, la cual tiene contacto con el ozono en una muestra de aire.

Respecto a los métodos de teledetección para la cuantificación del ozono, estos se pueden clasificar en aquellos que utilizan técnicas fotométricas o espectrorradiométricas y LIDAR (Light Detection And Ranging). Los primeros se emplean para obtener el espesor total reducido de la columna de ozono atmosférico, tanto con instrumentos situados en el suelo como a bordo de satélites. Emplean la luz solar directa, o bien reflejada, por la Tierra o difundida por la atmósfera (Inzunza, 2012 ).

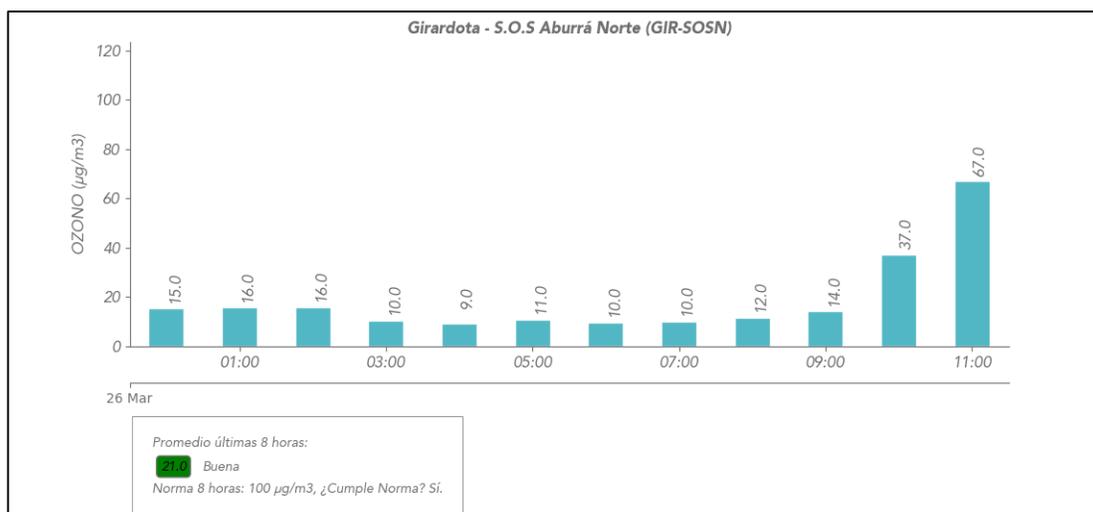
En el Valle de Aburrá, área de estudio de este trabajo, se dispone de diversas tecnologías que involucran el muestreo in-situ y remoto de la atmósfera. Haciendo alusión al gas ozono, como centro de esta investigación se puede referenciar el monitoreo in-situ realizado por el Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá - SIATA y el remoto disponible desde las plataformas satelitales de NASA (National Aeronautics and Space Administration).

## **2.2. Monitoreo in-situ de O<sub>3</sub> en el Valle de Aburrá**

En Colombia, desde los años 80 se han venido estudiando variables atmosféricas por medio de los Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire - SVCA, que mediante diferentes equipos en superficie tienen la capacidad de monitorear y cuantificar, entre otros, la concentración de O<sub>3</sub> troposférico (Huerta, 2015). En el Valle de Aburrá, ubicado en la región Andina noroccidental del país (6,26°N, 75,58°O), el SVCA que monitorea parámetros como el material particulado PM10 y PM2.5 y gases traza como SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO y O<sub>3</sub>, entre otros tantos, es el Área Metropolitana del Valle de Aburrá - AMVA, la cual es una entidad de derecho público que integra 10 municipios: Medellín, Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Itagüí, Sabaneta, Envigado, La Estrella y Caldas, por medio de diferentes dinámicas ambientales, económicas, sociales, demográficas, culturales y tecnológicas (AMVA, 2019).

SIATA es un proyecto estratégico del AMVA con el que se lleva a cabo la gestión del riesgo mediante más de 12 redes monitoreo meteorológicas, hidrológicas, sísmicas y calidad del aire (SIATA, 2018). Respecto a esta última, SIATA cuenta con estaciones automáticas, semiautomáticas y manuales para el monitoreo y cuantificación de distintos contaminantes en la atmósfera como PM10, PM2.5, O<sub>3</sub>, CO, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub>, entre otros. La tabla A1 en los anexos lista las estaciones SIATA que actualmente monitorean la concentración de O<sub>3</sub> en superficie, así como las estaciones meteorológicas de las cuales se obtuvo información de parámetros como temperatura, humedad relativa, velocidad del viento e intensidad de radiación total en superficie, involucrados en este trabajo. La tabla A2, en el mismo anexo, resume las características técnicas de los equipos incorporados en estas estaciones para la cuantificación del O<sub>3</sub> y de los parámetros meteorológicos.

La concentración de ozono en superficie es realizada de manera automática por SIATA mediante fotometría ultravioleta basada en la ley de Beer-Lambert-Bouguer, utilizando la propiedad que tienen las moléculas de ozono para absorber parte de esta radiación en la franja espectral de Hartley (Montoya & Tamayo, 2013). La figura 2.1 muestra un ejemplo del tipo de mediciones reportado por SIATA para este gas traza.



**Figura 2.1** . Concentración de O<sub>3</sub> en superficie en el Valle de Aburrá reportado por SIATA. Ejemplo tomado para la estación 3 ubicada en el municipio de Girardota, el 26-03-2019. Imagen tomada de <https://siata.gov.co>

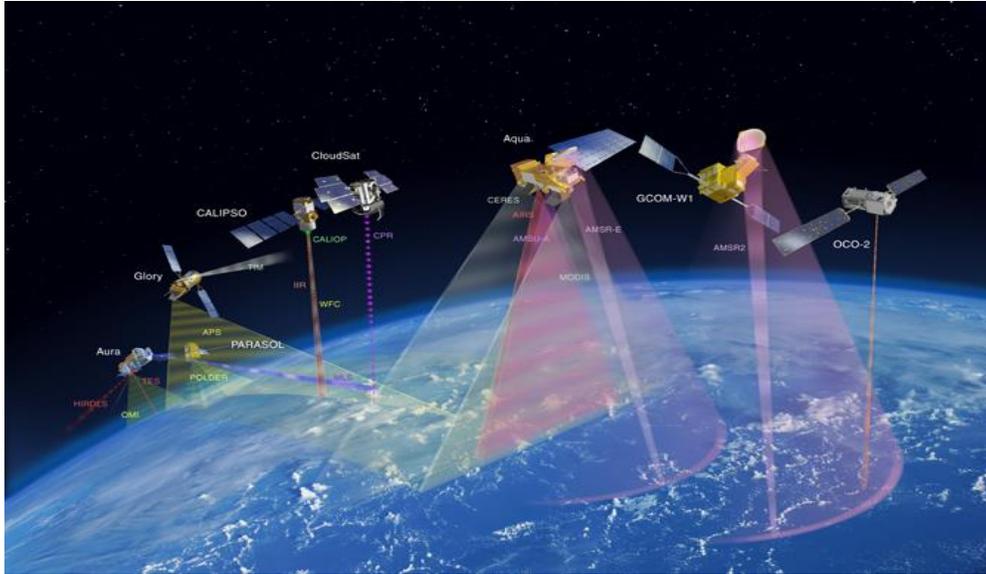
Las unidades de medida para la concentración de ozono en superficie se expresan habitualmente en términos de la masa de ozono existente en un cierto volumen de aire. Habitualmente, de acuerdo a las normas internacionales, se utiliza como referencia un metro cúbico (m<sup>3</sup>), por lo que, dada la pequeña cantidad de ozono presente en el aire, esta se suele expresar en un submúltiplo del gramo (microgramo

= millonésima de gramo =  $\mu\text{g}$ ). Así, es habitual referir las concentraciones de ozono en microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), y de esta forma se hace en la legislación vigente en la que, a modo de referencia, se establecen límites de protección a la salud de  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (en promedio octohorario) o de información en  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (en promedio horario). También es frecuente indicar la concentración de ozono (y otros gases) como la proporción de dicho compuesto con relación al propio aire en el que se encuentra. Habitualmente, la masa de ozono presente en una muestra normal de atmósfera es en torno a diez millones de veces inferior a la del propio aire. Se usa en este sentido otra unidad que indica las partes de ozono por millón de partes de aire (denotado como ppm) o su submúltiplo mil veces inferior, ppb, que indica las partes por billón (entendiendo como el billón igual a mil millones). La relación entre ellas es la siguiente:  $0,001 \text{ ppm} = 1 \text{ ppb} = 1,96 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (IDEAM, 2018).

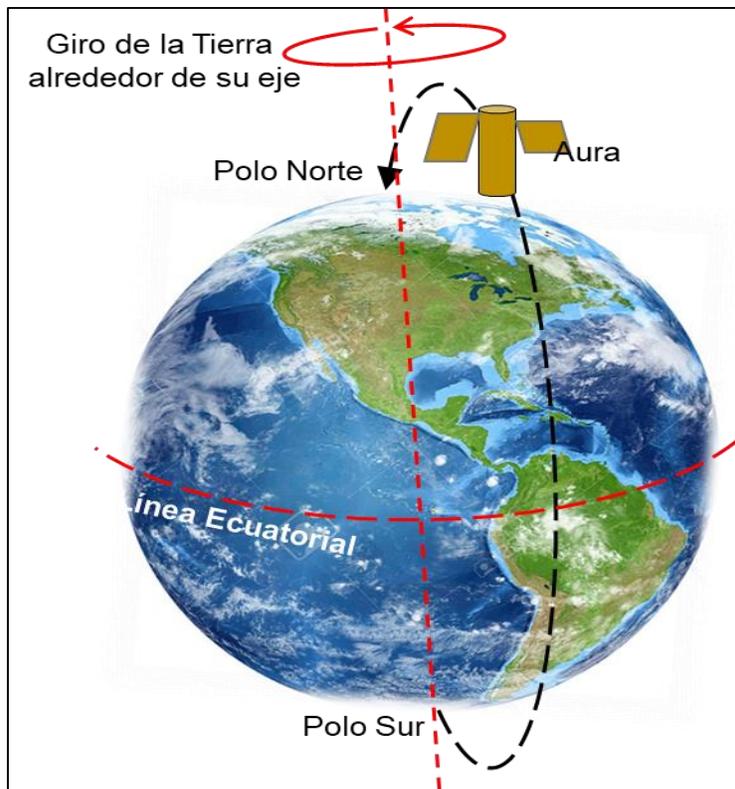
### **2.3. Monitoreo remoto del $\text{O}_3$ en el Valle de Aburrá**

SIATA no posee equipos de detección remota para monitorear el contenido del gas  $\text{O}_3$  en la tropósfera del Valle de Aburrá. No obstante, existe una variedad de satélites que con regularidad sobrevuelan el territorio colombiano, con equipamiento a bordo que de manera remota cuantifica algunos parámetros relacionados con la calidad del aire. Uno de ellos es el satélite Aura (del latín Brisa) de NASA, el cual se lanzó el 15 de julio de 2004 y hace parte del sistema de observación de la tierra (EOS, por su sigla en inglés) en la constelación de satélites A –Train: Aqua, Aura, PARASOL, CALIPSO, CloudSat, GCOM-W1, OCO-2 y Glory, donde cada misión tiene funciones científicas diferentes (NASA , 2012 ). La figura 2.2 muestra un esquema de la formación de la constelación A-Train.

La misión Aura tiene como principal objetivo estudiar la química y la dinámica de la atmósfera terrestre, constituyéndose en una herramienta importante para interpretar los fenómenos asociados al cambio climático y el agotamiento de la capa de ozono. Circunda el globo a una altitud de 705 km en una órbita polar sincronizada con el sol con un ciclo de repetición exacto de 16 días y cruza por el ecuador en el nodo ascendente a las 18.45 UTC (1:45 p.m. hora local) (OMI Team , 2012). La figura 2.3 esquematiza la órbita polar de la misión Aura.



**Figura 2.2.** Formación de la constelación de satélites A-Train de NASA. Imagen tomada de [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/a-train/a-train.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/a-train/a-train.html)



**Figura 2.3.** Representación gráfica de la órbita polar que describe el satélite Aura.

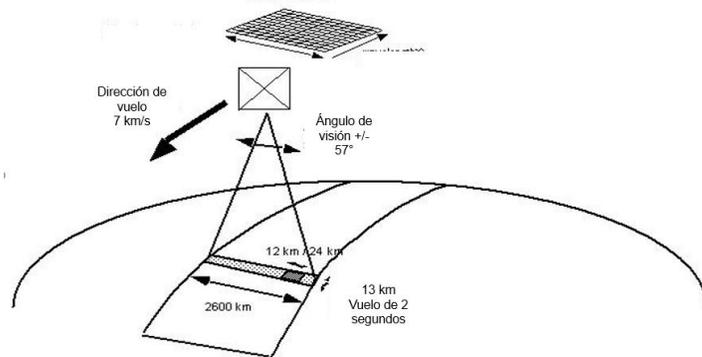
La misión Aura está equipada con varios instrumentos de teledetección, los cuales tienen la capacidad de monitorear gran número de gases y partículas de la atmósfera terrestre. Ellos son:

- *La Sonda Dinámica de Alta Resolución, HIRDLS.*  
Detecta las emisiones térmicas en el infrarrojo en la troposfera superior, la estratosfera y la mesósfera, determinando: temperatura, concentraciones de O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>, HNO<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, CFC11, CFC12, ClONO<sub>2</sub> y aerosoles; debido a los estados rotacionales y vibracionales.
- *La Sonda de Microwave Limb, MLS.*  
Detecta emisiones de microondas de los estados rotacionales y vibracionales de las moléculas en la atmósfera.
- *El Espectrómetro de Emisión Troposférica, TES.*  
Al igual que *HIRDLS*, detecta las emisiones térmicas en el infrarrojo debido a los estados rotacionales y vibracionales de las moléculas en la atmósfera.
- *El Instrumento de Monitoreo de Ozono, OMI.*  
Detecta la absorción molecular de la luz solar dispersada por la tierra, en longitudes de onda ultravioleta y visible.

Esta tesis se centró en el análisis de la información relacionada al contenido de ozono en la atmósfera del Valle de Aburrá, suministrada por el instrumento OMI.

#### **2.4. El Instrumento de Monitoreo de Ozono - OMI**

El instrumento de monitoreo de ozono – OMI, por sus siglas en inglés, a bordo del satélite Aura de NASA, es un espectrómetro UV-VIS con visualización nadir, el cual mide la radiación solar reflejada y retrodispersada por la superficie terrestre con una resolución espectral entre 270 nm - 500 nm, una cobertura en la tierra con una resolución espacial promedio de pixeles de 13 x 24 km<sup>2</sup> en un barrido de 2.600 km de ancho, como se muestra en la figura 2.4. La tabla 2.1 resume las principales características técnicas de este instrumento.



**Figura 2.4.** Barrido y tamaño promedio de pixel en la superficie terrestre detectado por el instrumento OMI.

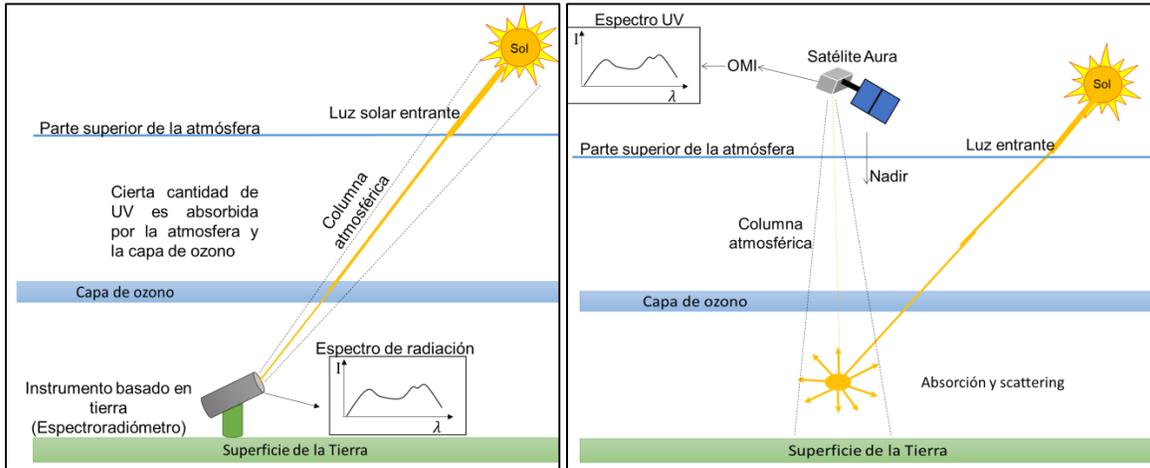
Desde el 9 de agosto de 2004 el instrumento OMI ha cuantificado parámetros relacionados con la química y la calidad del aire tales como los aerosoles, las nubes, los gases traza  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_2$ , BrO, HCHO, OCIO y la radiación UV entre los 290 nm y 320nm (UV-B)) (AURA-OMI, 2019).

Respecto a la cuantificación del ozono en columna atmosférica, OMI basa su principio de funcionamiento en la técnica DOAS (Espectroscopia de Absorción Óptica Diferencial), la cual es una técnica de medición que determina la concentración de gases en la atmósfera por medio de la absorción en la región UV y visible del espectro electromagnético. Es una técnica de gran exactitud y muy versátil. La técnica DOAS a partir de una fotografía espectral de la composición atmosférica permite cuantificar la concentración de los distintos constituyentes atmosféricos.

**Tabla 2.1.** Características técnicas del Instrumento OMI. Información tomada de <https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.html>.

Características	Parámetros
Región VIS	350 - 500 nm
Región UV	UV-1, 270 a 314 nm, UV-2, 306 a 380 nm
Resolución espectral	1,0 - 0,45 nm FWHM
Muestreo espectral	2-3 para FWHM
FOV del telescopio	114 (2600 km en tierra)
IFOV	3 km, binned a 13 x 24 km
Detector	CCD: 780 x 576 (espectral x espacial) píxeles
Masa	65 kg
Ciclo de trabajo	60 minutos en el lado de la luz del día
Potencia	66 vatios
Transferencia de datos	0.8 Mbps (promedio)

La técnica DOAS utilizada por OMI se clasifica como una técnica de detección remota pasiva, en la cual se estudia espectralmente la luz solar reflejada por la superficie de la tierra. Esta luz contiene la información de los constituyentes en la atmósfera debido a la previa interacción que esta ha tenido con ellos. La figura 2.4. muestra un esquema del funcionamiento del sistema DOAS posicionados en superficie y posicionados en plataformas satelitales.



**Figura 2.5.** Esquematación de principio de teledetección de un DOAS. Izquierda: para un sistema anclado en la superficie de la tierra. Derecha: para un sistema a bordo de un satélite, como por ejemplo OMI a bordo del satélite Aura

El principio físico de funcionamiento de un DOAS se basa en la ley de Beer-Lambert-Bouger, la cual da cuenta de la atenuación de la luz, debido a la absorción y al scattering, al propagarse a través de un medio (Gil & Mello, 2011). Matemáticamente esta ley se puede expresar como (Montoya & Tamayo, 2013):

$$T(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} e^{-k(\lambda) z} \quad (8)$$

donde  $T(\lambda)$  es la transmitancia;  $I(\lambda)$  la intensidad de la luz medida luego de atravesar el medio;  $I_0(\lambda)$  la intensidad de luz referente;  $k(\lambda)$  el coeficiente de atenuación que da cuenta de la absorción y el scattering; y  $z$  la longitud del camino de trasmisión.

En el coeficiente de atenuación  $k(\lambda)$  están involucrados cuatro procesos individuales: absorción molecular, scattering molecular, absorción por aerosoles y scattering por aerosoles. En un modelo matemático esto se puede escribir así (Navarrete & Salamanca, 2011):

$$k(\lambda) = \alpha_m(\lambda) + \beta_m(\lambda) + \alpha_a(\lambda) + \beta_a(\lambda) \quad (9)$$

donde  $\alpha$  y  $\beta$  denotan los procesos de absorción y de scattering respectivamente; y los subíndices  $m$  y  $a$  rotulan a las moléculas a los aerosoles respectivamente.

La cuantificación del contenido de ozono en columna de atmósfera a partir de las mediciones espectrorradiométricas realizadas por OMI se basa en la metodología propuesta por Dobson (Navarrete & Salamanca, 2011). En ella se relacionan la absorción causada por este gas a dos longitudes de onda (una que es fuertemente absorbida y otra poco absorbida) en las franjas UV-A y UV-B. Para cada par de longitudes de onda se computa los pares Dobson, según la ecuación (10):

$$\Theta = \frac{\left[ \text{Log} \left( \frac{I_{o\lambda c}}{I_{o\lambda l}} \right) - \text{Log} \left( \frac{I_{\lambda c}}{I_{\lambda l}} \right) \right]}{m_o(k_{oc} - k_{ol})} - \frac{m_r(k_{dc} - k_{dl})}{m_o(k_{oc} - k_{ol})} \quad (10)$$

donde  $I_\lambda$  es irradiancia después de atravesar la atmósfera;  $I_{o\lambda}$  es la irradiancia referente;  $k_o$  es el coeficiente de absorción del ozono;  $k_r$  es el coeficiente de scattering molecular de aire puro; los subíndices  $c$  y  $l$  hacen referencia a onda corta y larga respectivamente, en cada franja;  $m_o$  es masa óptica relativa de ozono; y  $m_r$  es camino óptico o masa óptica del aire, atravesada por la radiación en el paso por la atmósfera,  $k_{oc}$  y  $k_{ol}$  son los coeficientes espectrales de absorción por ozono de las radiaciones correspondientes a las longitudes corta y larga del par elegido,  $k_{dc}$  y  $k_{dl}$  son los coeficientes espectrales de dispersión molecular por aire puro de las radiaciones correspondientes a las longitudes corta y larga del par elegido.

La masa óptica relativa de ozono,  $m_o$ , y la masa óptica del aire,  $m_r$ , en la ecuación (10) se pueden calcular así;

$$m_o = \frac{\frac{1+z_3}{r_e}}{\left[ \cos^2 \theta_z + 2 \left( \frac{z_3}{r_e} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (11)$$

$$m_r = [\cos \theta_z + 0.50572 (96.07995 - \theta_z)^{-1.6364}]^{-1} \quad (12)$$

donde  $z_3$  es la altura sobre el nivel del mar del sitio de medición;  $r_e$  el radio medio de la tierra; y  $\theta_z$  el ángulo cenital correspondiente al sitio y la hora de la medición.

La relación entre los pares Dobson  $\Theta_A$  y  $\Theta_B$  permite obtener el ozono total, de acuerdo a lo establecido en la ecuación (13):

$$\Phi = \frac{(N_A - N_B) - m_r[(k_{rc} - k_{rl})A - (K_{rc} - k_{rl})B]}{m_o[(k_{oc} - K_{ol})A - (k_{oc} - k_{ol})B]} \quad (13)$$

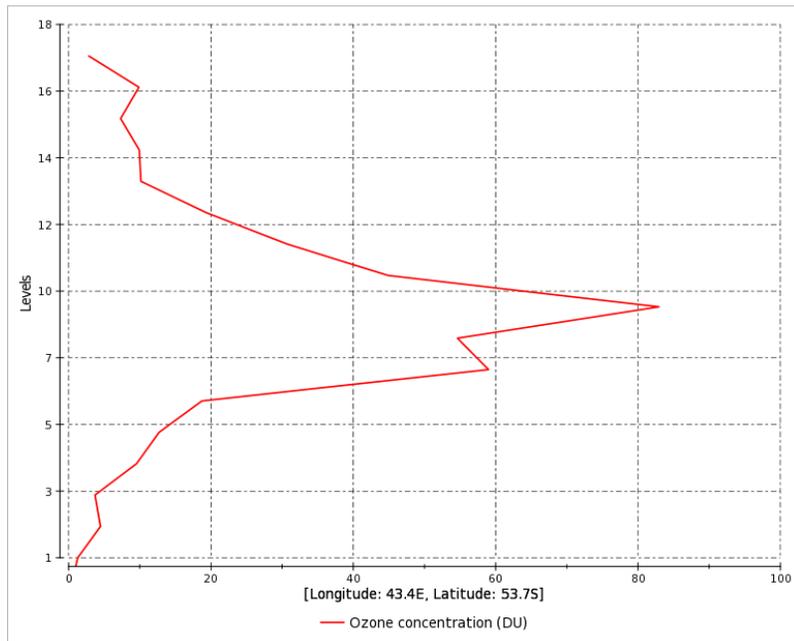
donde  $N_A = \left[ \text{Log} \left( \frac{I_{o\lambda c}}{I_{o\lambda l}} \right) - \text{Log} \left( \frac{I_{D\lambda c}}{I_{D\lambda l}} \right) \right]$  para el par de longitud de onda en la región UV-A y  $N_B = \left[ \text{Log} \left( \frac{I_{o\lambda c}}{I_{o\lambda l}} \right) - \text{Log} \left( \frac{I_{D\lambda c}}{I_{D\lambda l}} \right) \right]$  para el par de longitud de ondas en la región UV-B.

De esta manera, la unidad en la cual OMI cuantifica el ozono es el Dobson (UD), que en condiciones normales como 1 atm de presión y 0°C de temperatura, equivale a 0,01 milímetros de espesor de capa de ozono. Una UD representa  $2.69 \times 10^{16}$  moléculas por centímetro cuadrado de ozono (Montoya & Tamayo, 2013)

Los productos OMI asociados al ozono se clasifican como de nivel 1, 2 y 3. La tabla 2.1 lista dichos productos (OMI Team , 2012)

**Tabla 2.2.** Niveles de procesamiento de datos y productos asociados al O<sub>3</sub> a partir del instrumento OMI a bordo del satélite Aura de NASA.

Nivel	Producto	Unidades
L1	Datos sin procesar	--
L2	Perfiles verticales de O <sub>3</sub>	UD
L3	Contenido de O <sub>3</sub> en columna atmosférica	UD



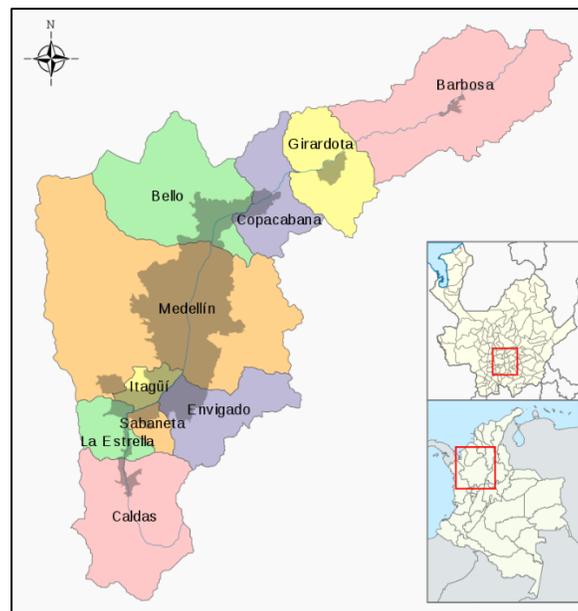
**Figura 2.6.** Ejemplo de perfil vertical de ozono obtenido de los productos L2 reportados por el instrumento OMI a bordo del satélite AURA – NASA. Imagen tomada de: [https://daac.gsfc.nasa.gov/datasets/OMO3PR\\_V003/summary?keywords=o3](https://daac.gsfc.nasa.gov/datasets/OMO3PR_V003/summary?keywords=o3)

En esta investigación se analizaron los productos L2, para el Valle de Aburrá desde la junio de 2012 hasta julio de 2018, de los cuales se obtuvo información de la distribución espacio-temporal y del contenido en columna atmosférica del ozono en esta región. La figura 2.5 muestra un ejemplo de las mediciones derivadas de los productos L2 suministradas por OMI.

## Capítulo 3

### 3.1 Región de estudio

El Valle de Aburrá es un complejo Valle ubicado en la región tropical montañosa al noroccidente de Colombia, a una altura promedio de 1470 m.s.n.m. en la cordillera de Los Andes ( $6^{\circ}15'N$ ,  $75^{\circ}36'O$ ). Topográficamente es un Valle bastante estrecho que se encuentra rodeado de montañas que pueden alcanzar hasta los 3000 m.s.n.m. y es atravesado de sur a norte por el río Medellín. Su climatología se ve influenciada por el océano Pacífico, el mar Caribe, la región amazónica y los vientos Alisios provenientes del este. Su zona urbana está constituida por diez municipios densamente poblados cuya creciente población se aproxima a los cuatro millones de habitantes (AMVA, 2019), ver figura 3.1.



**Figura 3.1.** Ubicación geográfica del Valle de Aburrá en los Andes colombianos. Imagen tomada de <https://www.metropol.gov.co/planeacion>

Estas características, sumadas al relativo bajo flujo de corrientes de viento dentro del valle, propician condiciones para la ocurrencia de largos periodos de estabilidad atmosférica, en los cuales los diversos contaminantes emitidos a la atmósfera, debido a la actividad industrial y la emisión de gases y partículas por el parque automotor, queden atrapados dentro de la atmósfera del valle, desencadenando episodios críticos de extrema contaminación, deteriorando la calidad del aire local.

Episodios que afectan directa e indirectamente la salud de la población y los diversos ecosistemas existentes en esta región.

Uno de los contaminantes permanentemente monitoreado en este Valle es el ozono troposférico, cuyo contenido en la troposfera se ha analizado en este trabajo mediante mediciones in-situ y remotas.

### 3.2 Adquisición y tabulación de datos

Mediciones in-situ, en la zona urbana del Valle de Aburrá, de la concentración de ozono en superficie y de parámetros meteorológicos como el porcentaje de humedad relativa - HR, la temperatura - T, la rapidez del viento - V y la intensidad de radiación total en superficie - I, se obtuvieron a través de la plataforma web de SIATA ([https://siata.gov.co/siata\\_nuevo](https://siata.gov.co/siata_nuevo)); los datos de perfiles verticales de ozono y de contenido total de este gas en columna atmosférica se obtuvieron a través de la plataforma web de NASA para el satélite Aura (<https://search.earthdata.nasa.gov/search?fi=OMI>).

El historial de datos disponibles en SIATA se remonta al año 2012 y los de Aura al año 2004. Generalidades sobre las características de los archivos descargados involucrados en este trabajo se relacionan en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1.** Características generales de archivos in-situ y satelitales (OMI Team , 2012) (SIATA, 2018).

Parámetro monitoreado	Ventana temporal de datos descargados	Resolución temporal de medidas	Formato de archivo	Unidad de medida
Ozono en superficie	Junio de 2012 - Julio de 2018	Horaria	CSV	ppb
%Humedad relativa	Enero de 2012 - Julio de 2018	Minuto	CSV	%
Temperatura	Enero de 2012 - Julio de 2018	Minuto	CSV	°C
Viento	Enero de 2012 - Julio de 2018	Minuto	CSV	m/s
Intensidad de radiación total	Marzo de 2016 - Julio de 2018	Minuto	CSV	W/m <sup>2</sup>
Perfiles verticales de Ozono	Octubre de 2004 – Julio de 2018	Diario	HDF	U.D.
Ozono total en columna atmosférica	Octubre de 2004 – Julio de 2018	Diario	HDF	U.D.

Las tablas A3 y A4, en los anexos, describen de manera general la estructura de los archivos CSV y HDF suministrados por SIATA y NASA respecto al contenido de ozono en el Valle de Aburrá. Para la lectura y decodificación de estos contenidos se realizaron rutinas algorítmicas en el software *Mathematica*.

### 3.2.1. Distribución espacio-temporal del O<sub>3</sub> troposférico en el Valle de Aburrá

En procura de realizar un análisis y una descripción general acerca de la distribución espacial del ozono contenido en el volumen definido por la columna atmosférica de la tropósfera de la zona urbana del Valle de Aburrá, así como una aproximación cualitativa sobre la dinámica promedio que este gas describe en esta región del país, se procesó la información contenida acerca de este constituyente atmosférico en los datos SIATA y OMI de nivel L2.

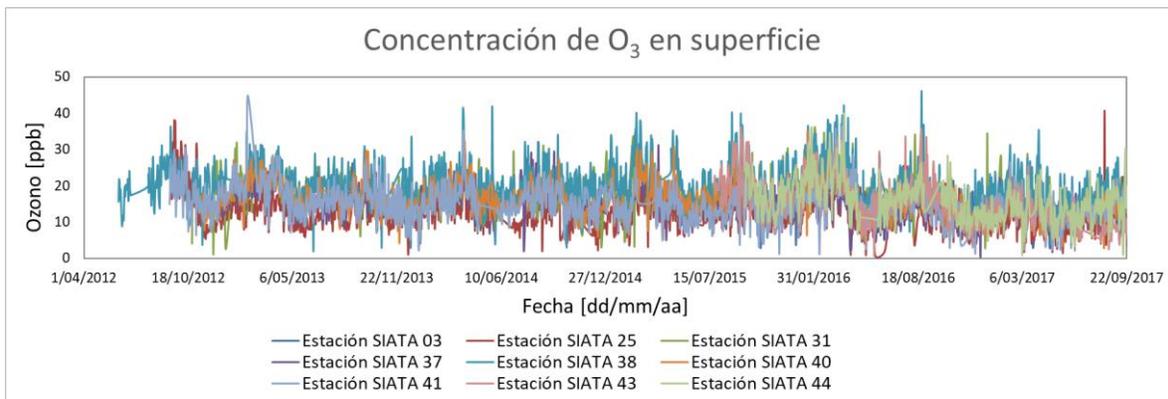
Primeramente, se identificó la ubicación geográfica de las estaciones SIATA que monitorean O<sub>3</sub> en la zona urbana del Valle de Aburrá, ver tabla 3.2.

**Tabla 3.2.** Estaciones de la red de calidad del aire de SIATA que miden ozono en el Valle de Aburrá (SIATA, 2018).

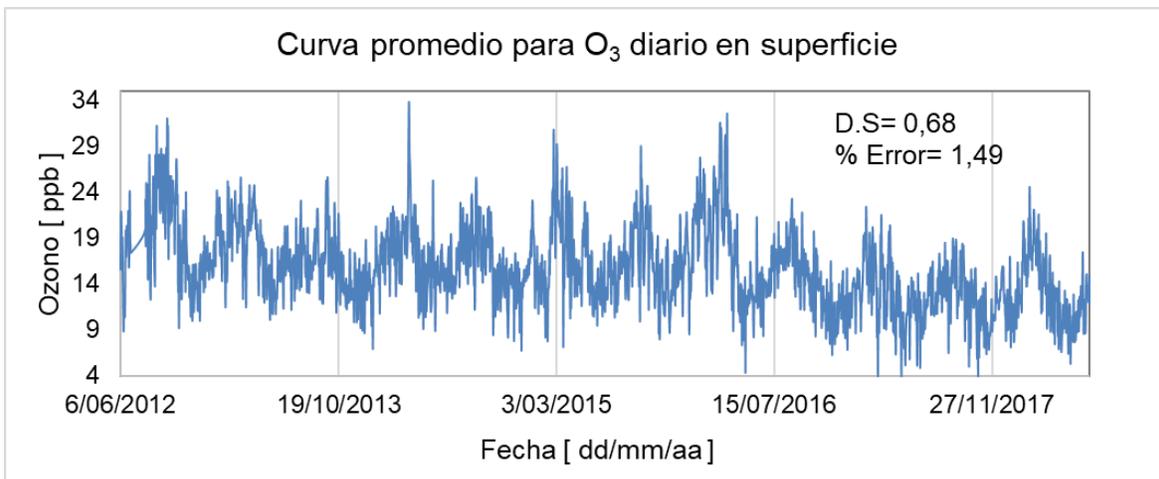
<b>Estaciones de monitoreo de O<sub>3</sub> en el Valle de Aburrá</b>				
<b>Lugar</b>	<b>Lat.</b>	<b>Long.</b>	<b># Estación</b>	<b>Zona</b>
Girardota S.O.S	6,37904	-75,45091	3	Norte
UNAL - Medellín	6,26337	-75,577	25	Centro
U - La Sallista	6,09908	-75,63863	31	Sur
U - San Buenaventura	6,3307	-75,56867	37	Norte
I.E Concejo de Itagüí	6,1685	-75,64436	38	Sur
Parque de las Aguas	6,40671	-75,41949	40	Norte
U de Medellín	6,23018	-75,60996	41	Occidente
Tanque Miraflores	6,22997	-75,54919	43	Oriente
Tanques la Y	6,18254	-75,55064	44	Oriente

Los datos descargados para cada estación de la tabla 3.2 contienen archivos mensuales para la concentración de O<sub>3</sub> en superficie. Cada archivo reporta datos con una resolución horaria, los cuales son clasificados como datos válidos y no válidos, según el criterio de clasificación establecido por SIATA. Luego de la selección de datos válidos, se calcularon los promedios diarios de la concentración de este gas traza para cada una de las estaciones y se realizaron gráficos de esta concentración en función del tiempo, como se muestra en la figura 3.2. De esta

figura se observa que la concentración promedio de ozono cuantificada por las diferentes estaciones SIATA, a lo largo y ancho del valle, no difieren significativamente unas de otras, por lo que se procedió a realizar un promedio aritmético de estas cantidades, con el objetivo de establecerlo como dato representativo de todas las estaciones en la zona urbana del Valle de Aburrá, de la concentración de O<sub>3</sub> en superficie. Este último resultado se muestra en la figura 3.3.



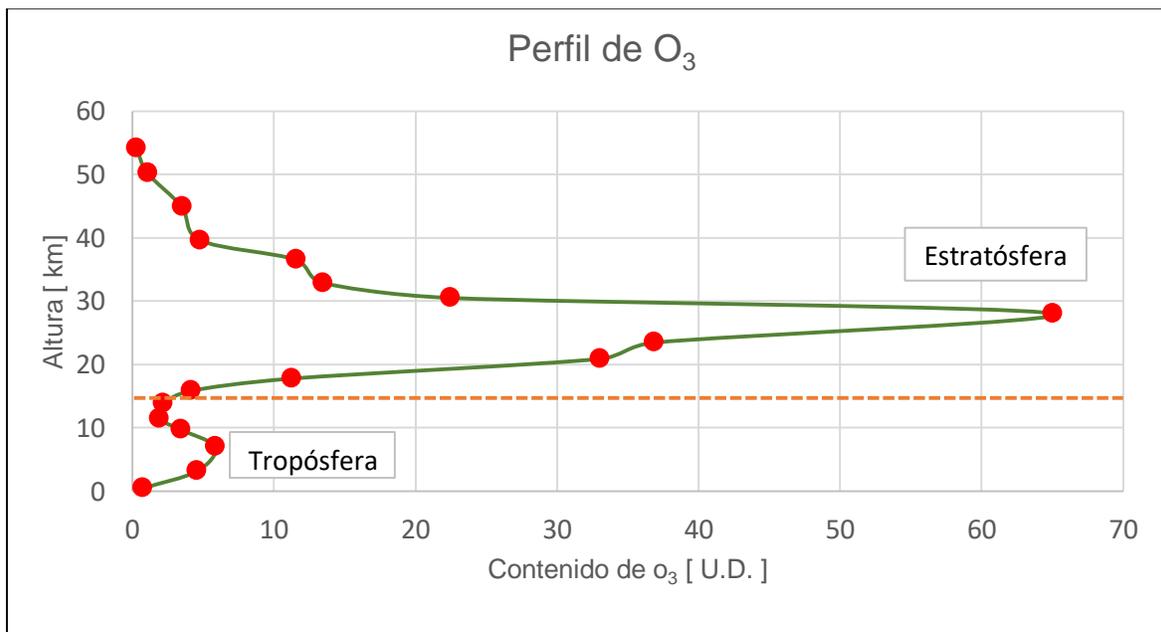
**Figura 3.2.** Promedios diarios de concentración de O<sub>3</sub> en superficie en cada una de las estaciones SIATA.



**Figura 3.3.** Curva promedio de todas las estaciones SIATA que miden la concentración de ozono en superficie.

Los datos e información contenida en la figura 3.3. se utilizaron para el análisis, correlaciones y modelamiento del ozono troposférico con datos satelitales y parámetros meteorológicos.

Ahora bien, de la información contenida en las figuras 3.2. y 3.3. se puede realizar un análisis acerca de la distribución del ozono troposférico a lo largo y ancho (horizontal) del Valle de Aburrá, no obstante, una descripción sobre la distribución de este gas en columna atmosférica (vertical) se debe hacer a partir de los perfiles verticales de ozono, obtenidos de los datos de nivel L2 del instrumento OMI. La figura 3.4. muestra un ejemplo de un perfil vertical de  $O_3$  en la columna atmosférica del Valle de Aburrá.



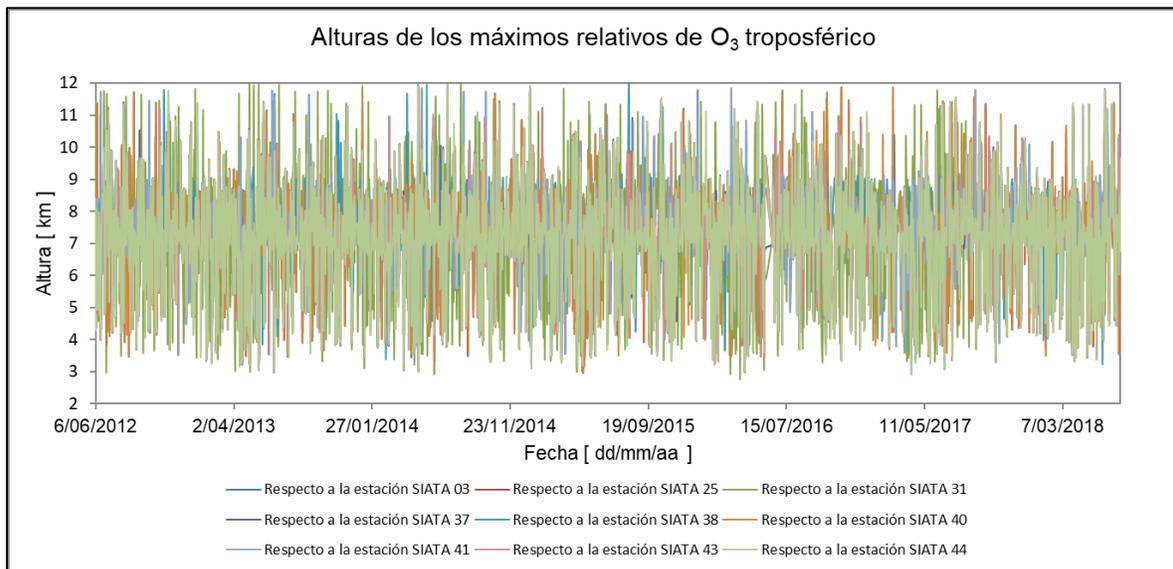
**Figura 3.4.** Perfil típico de  $O_3$  en columna atmosférica en el Valle de Aburra. Medido por el instrumento OMI el 01/01/2010.

Aunque la trayectoria geolocalizada del satélite Aura sobre el Valle de Aburrá tiene un periodo de 16 días, el ancho del barrido (swath) de 2.600 km que el instrumento OMI tiene en su campo de visión sobre la superficie terrestre, en su órbita ascendente, garantiza que diariamente se tengan datos satelitales de  $O_3$  en esta región del país. Si bien se obtuvieron datos desde el año 2004, en el análisis de los mismos se tuvieron en cuenta aquellos desde el año 2012, en concordancia con el historial de datos SIATA.

Seguidamente, considerando que los perfiles de  $O_3$  medidos en la zona norte del Valle pueden no corresponder con los medidos en las zonas sur, oriental u occidental, debido a que el tamaño en tierra de los pixeles detectados por OMI es

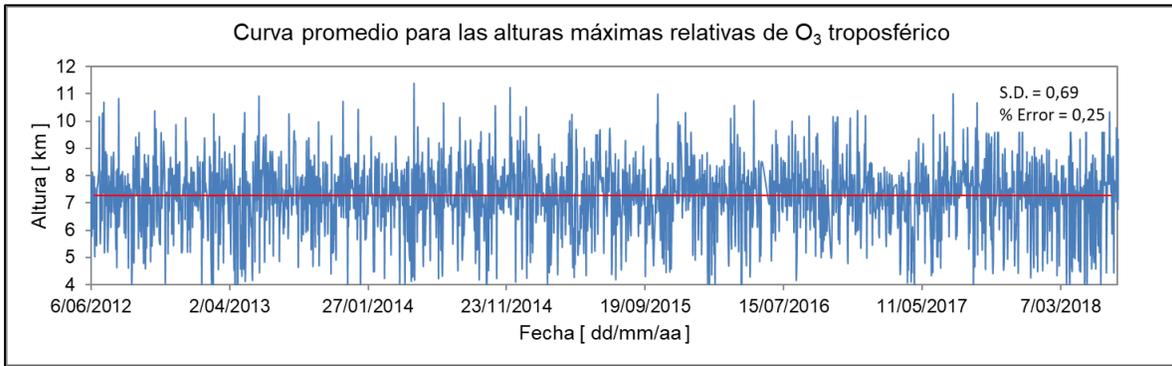
variable (más pequeños cerca de la trayectoria del satélite), se procedió a desestimar las posibles diferencias entre estos perfiles. Para ello, tomando las posiciones geográficas de las estaciones SIATA dentro del Valle de Aburrá como referentes en las distintas zonas dentro del mismo, se computaron y compararon los perfiles de  $O_3$  correspondientes a los pixeles más cercanos a cada estación.

El análisis se centró en el contenido de ozono en la tropósfera, específicamente en la ubicación (altura sobre la base del valle) y el valor del máximo relativo observado en el perfil para este estrato de atmósfera. La figura 3.5. muestra el resultado para la ubicación del máximo relativo.

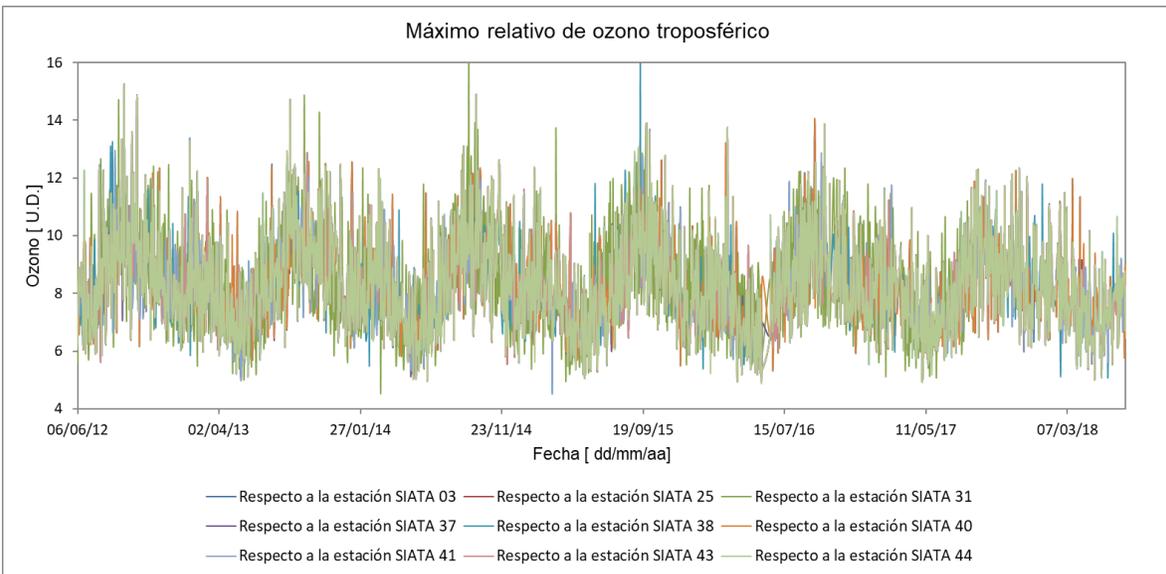


**Figura 3.5.** Alturas de los máximos relativos de  $O_3$  troposférico, obtenido del instrumento OMI a bordo del satélite AURA, respecto a la ubicación geográfica de las diferentes estaciones SIATA que cuantifican  $O_3$  en superficie.

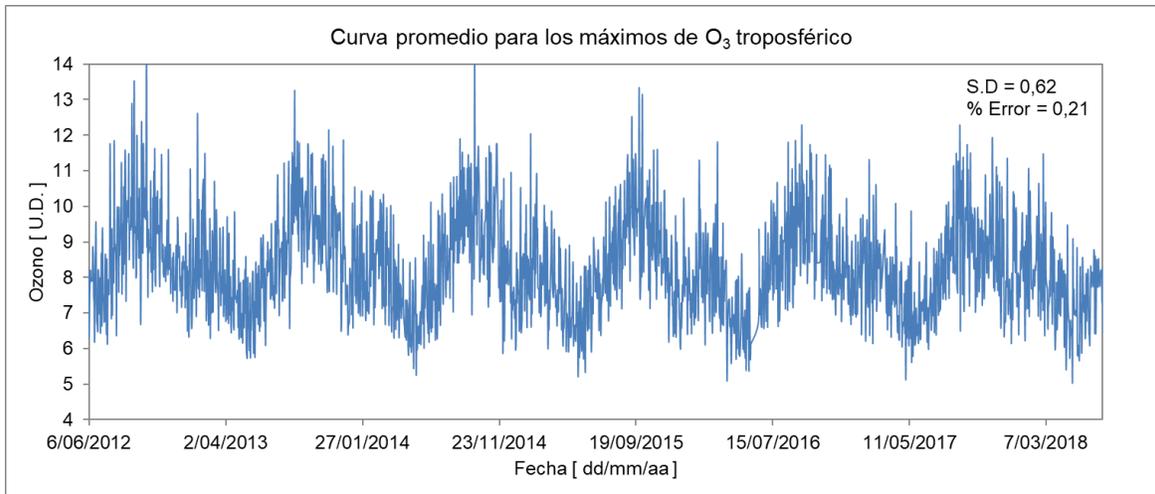
En la figura 3.5. no se aprecia diferencia significativa entre la posición de los máximos relativos cuantificados respecto a las diferentes estaciones SIATA, razón por la cual se procedió a computar el promedio aritmético entre ellos, cuyo resultado se muestra en la figura 3.6.



**Figura 3.6.** Curva promedio para las alturas de los máximos relativos de O<sub>3</sub> troposférico. La línea roja representa la altura promedio (7,23 km) alrededor de la cual oscilan estos máximos.



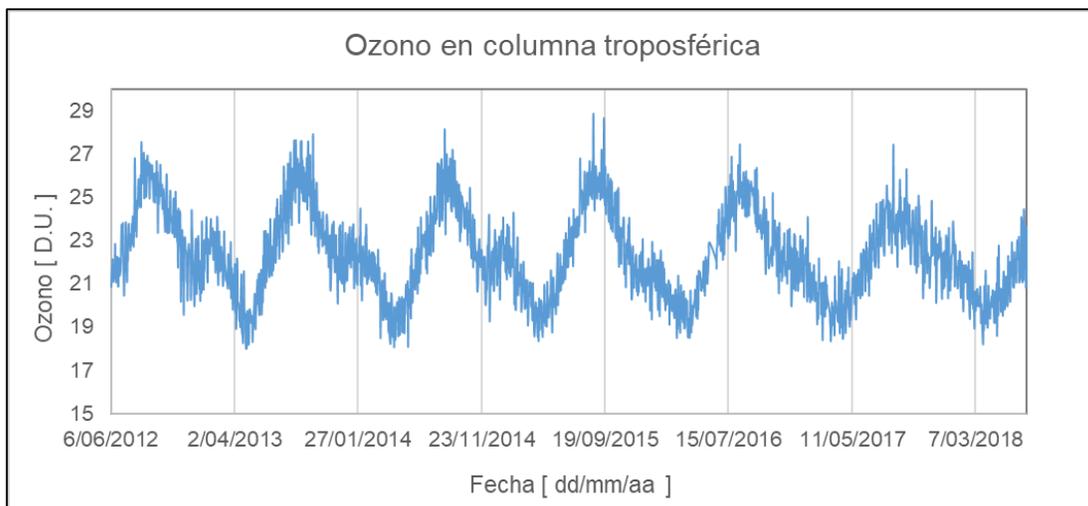
**Figura 3.7.** Máximo relativo de O<sub>3</sub> troposférico obtenido del instrumento OMI a bordo del satélite AURA, respecto a la ubicación geográfica de las diferentes estaciones SIATA que cuantifican O<sub>3</sub> en superficie.



**Figura 3.8.** Curva promedio para los máximos de O<sub>3</sub> troposféricos en los perfiles verticales de este gas traza sobre el Valle de Aburrá.

Similarmenete se procedió con los valores del máximo relativo en la tropósfera, cuyos resultados se muestran en las figuras 3.7. y 3.8.

De los datos e información contenida en las figuras 3.6. y 3.8. se derivan el análisis y descripción espacio-temporal del contenido de O<sub>3</sub> en columna troposférica en el Valle de Aburrá.



**Figura 3.9.** Contenido total promedio de ozono en columna atmosférica troposférica.

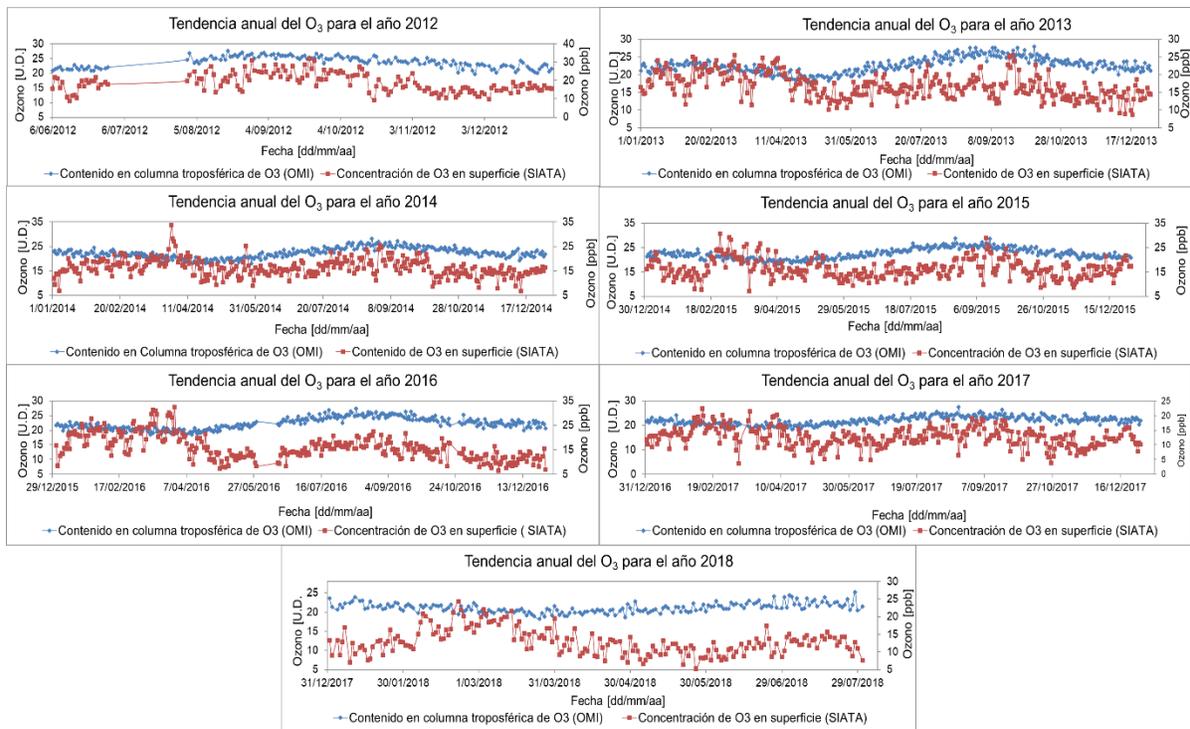
Finalmente, la suma de los valores de O<sub>3</sub> por debajo de los 12 km en el perfil vertical de este gas traza da como resultado el contenido total promedio de ozono en columna atmosférica troposférica (en U.D.) en la zona urbana del Valle de Aburrá. Este resultado se muestra en la figura 3.9.

Los resultados de las figuras 3.3. y 3.9. se utilizaron para correlacionar las mediciones in-situ y remotas de O<sub>3</sub> troposférico en la zona urbana del Valle de Aburrá.

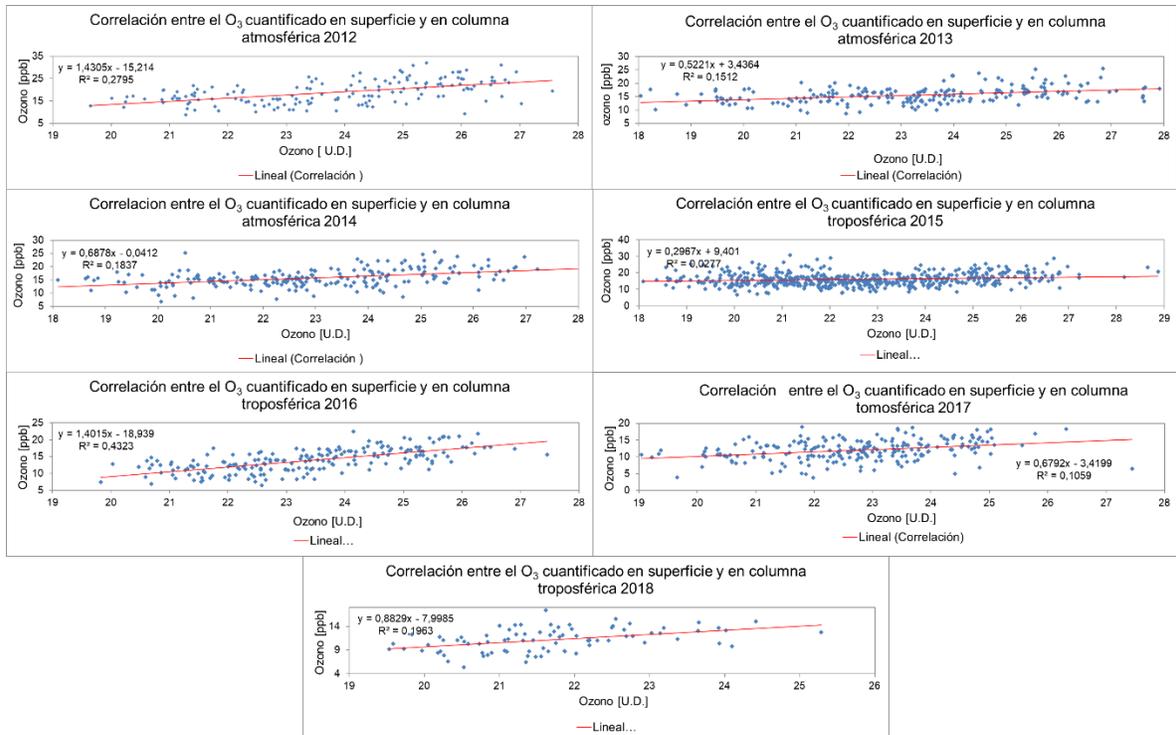
### *3.2.2. Correlación entre el ozono en columna atmosférica y la concentración de ozono en superficie*

Se buscó establecer una correlación entre las mediciones in-situ y remotas consignadas en las figuras 3.3. y 3.9. respectivamente. Se realizaron dos análisis: una para los promedios diarios y otro para los promedios mensuales de la concentración en superficie y el contenido en columna troposférica del O<sub>3</sub> en el Valle de Aburrá. Para ello, el volumen de datos a analizar se restringió a aquellos que coincidieran en fecha de medida.

De esta manera, para el caso de los promedios diarios se trabajó con un total de 1.938 datos comprendidos entre el 6 de junio de 2012 al 31 de julio de 2018. Seguidamente, para cada año involucrado en este estudio, se realizaron comparaciones gráficas de las tendencias en los ciclos anuales del contenido de ozono en el Valle de Aburrá, computados a partir de los datos SIATA y de OMI, como se muestra en la figura 3.10.



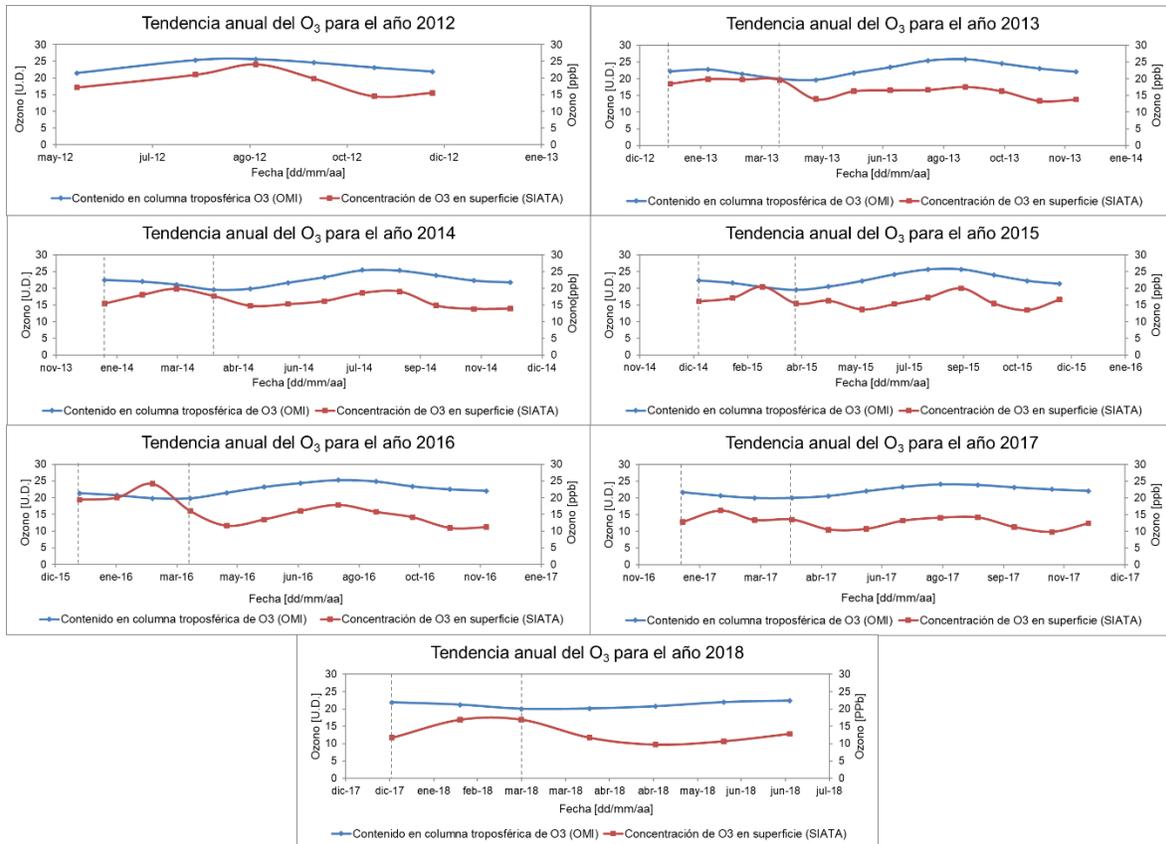
**Figura 3.10.** Tendencia anual del ozono troposférico medido in-situ y satelitalmente para los años 2012 a 2018.



**Figura 3.11.** Correlación lineal de promedios diarios de ozono troposférico medido en superficie y ozono troposférico medido por el instrumento OMI a bordo del satélite AURA, para los años 2012 a 2018.

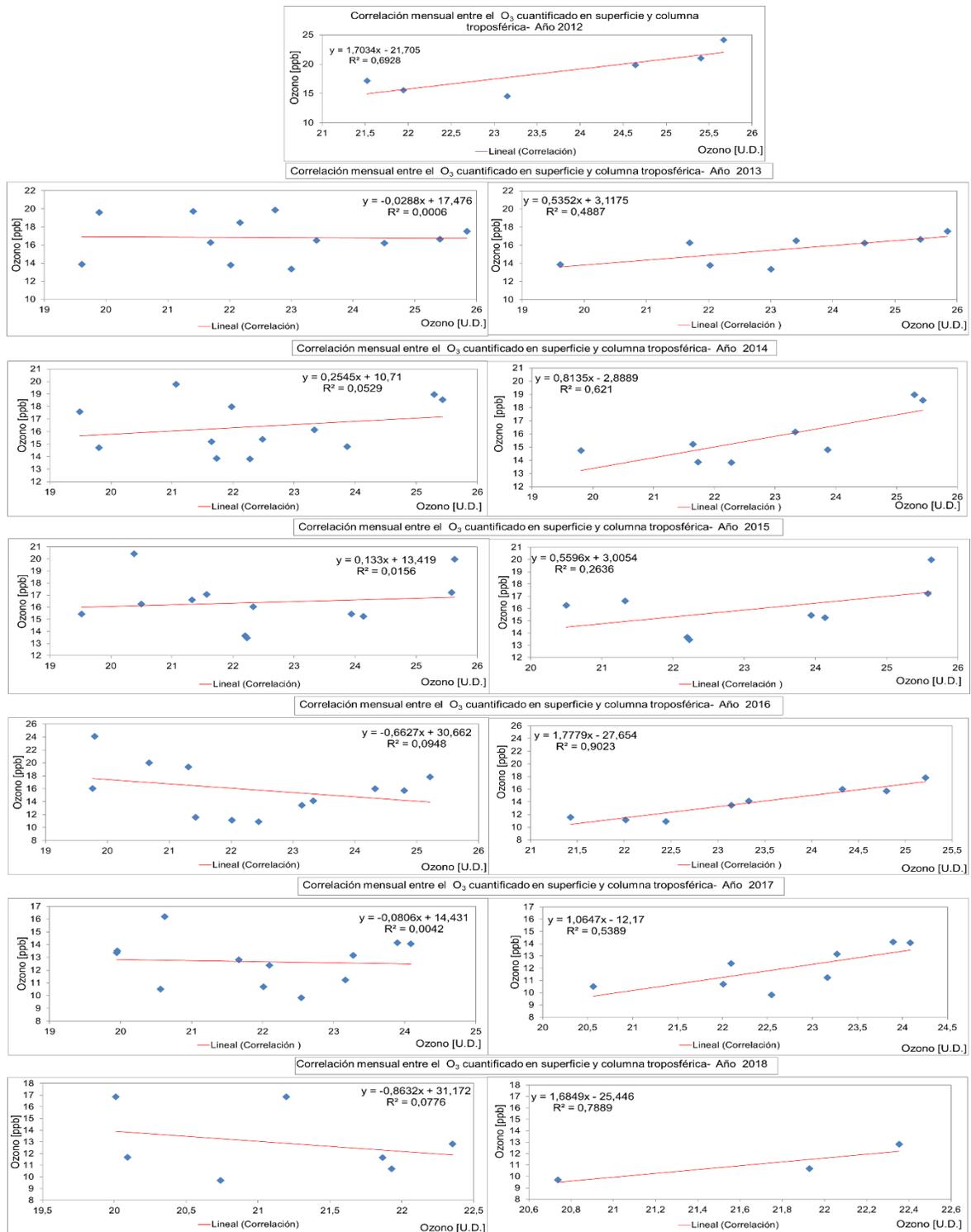
En la figura 3.10. se observa que puede existir una relación directa entre el O<sub>3</sub> cuantificado remotamente e in-situ, por lo que se buscó evidencia de correlaciones lineales entre estos dos tipos de mediciones, como se muestra en la figura 3.11.

De la misma manera como se procedió para los promedios diarios se hizo para los promedios mensuales. En este caso, el comparativo gráfico en la tendencia de los ciclos anuales del contenido de ozono en el Valle de Aburrá se muestra en la figura 3.12.



**Figura 3.12.** Tendencia anual del ozono troposférico respecto a los promedios mensuales medido in-situ y satelitalmente para los años 2012 a 2018.

En la figura 3.12. se observa que la posible relación directa entre el  $O_3$  cuantificado remotamente e in- situ se evidencia para los meses de escasa presencia de nubes en el Valle (de mayo a diciembre) (SIATA, 2018), de tal manera que, para estos meses se buscó evidencia de dichas correlaciones lineales. Los resultados se muestran en la figura 3.13.



**Figura 3.13.** Correlación entre promedios mensuales de ozono troposférico in-situ y remoto para los años 2012 a 2018. *Lado izquierdo:* correlación lineal para todos los meses; *Lado derecho:* correlación lineal sin los datos para los meses de mayor nubosidad.

Seguidamente, con la evidencia directa de la correlación existente entre el contenido de ozono medido en el Valle de Aburrá in-situ y remotamente, se procedió a establecer las posibles relaciones que la concentración de este gas traza tiene con los parámetros meteorológicos característicos en esta región, en procura de modelar su tendencia en el tiempo a partir de un modelo matemático simple.

### *3.2.3. Modelo de ozono troposférico a partir de parámetros meteorológicos*

Se buscó establecer modelos matemáticos simples que describieran la tendencia de la concentración del ozono troposférico en la zona urbana del Valle de Aburrá. Se establecieron tres modelamientos:

- Modelo de la curva de mejor ajuste a los datos experimentales de la concentración promedio diaria de  $O_3$  en superficie.
- Modelo de  $O_3$  en superficie como una función del contenido total de  $O_3$  en la tropósfera.
- Modelo de  $O_3$  como una función de parámetros meteorológicos como el porcentaje de humedad relativa - HR, la temperatura - T, la rapidez del viento - V y la intensidad de radiación total en superficie - I.

Para el primer modelamiento se analizaron, a partir de lo reportado en la figura 3.3., las tendencias anuales del ozono en superficie. Se observó que, en cada uno de los años involucrados en este estudio, la concentración en superficie de este gas traza describe ciclos periódicos de máximos y mínimos relativos, cuya tendencia se describe bastante bien con funciones sinusoidales, ver figura 3.14.

La tabla 3.3 resume la información sobre estas curvas de tendencia.

Las curvas sinusoidales reportadas en la tabla 3.3. para cada caso de la figura 3.14. sirvieron como base para obtener un modelo matemático simple para la concentración de  $O_3$  en superficie en la zona urbana del Valle de Aburrá.

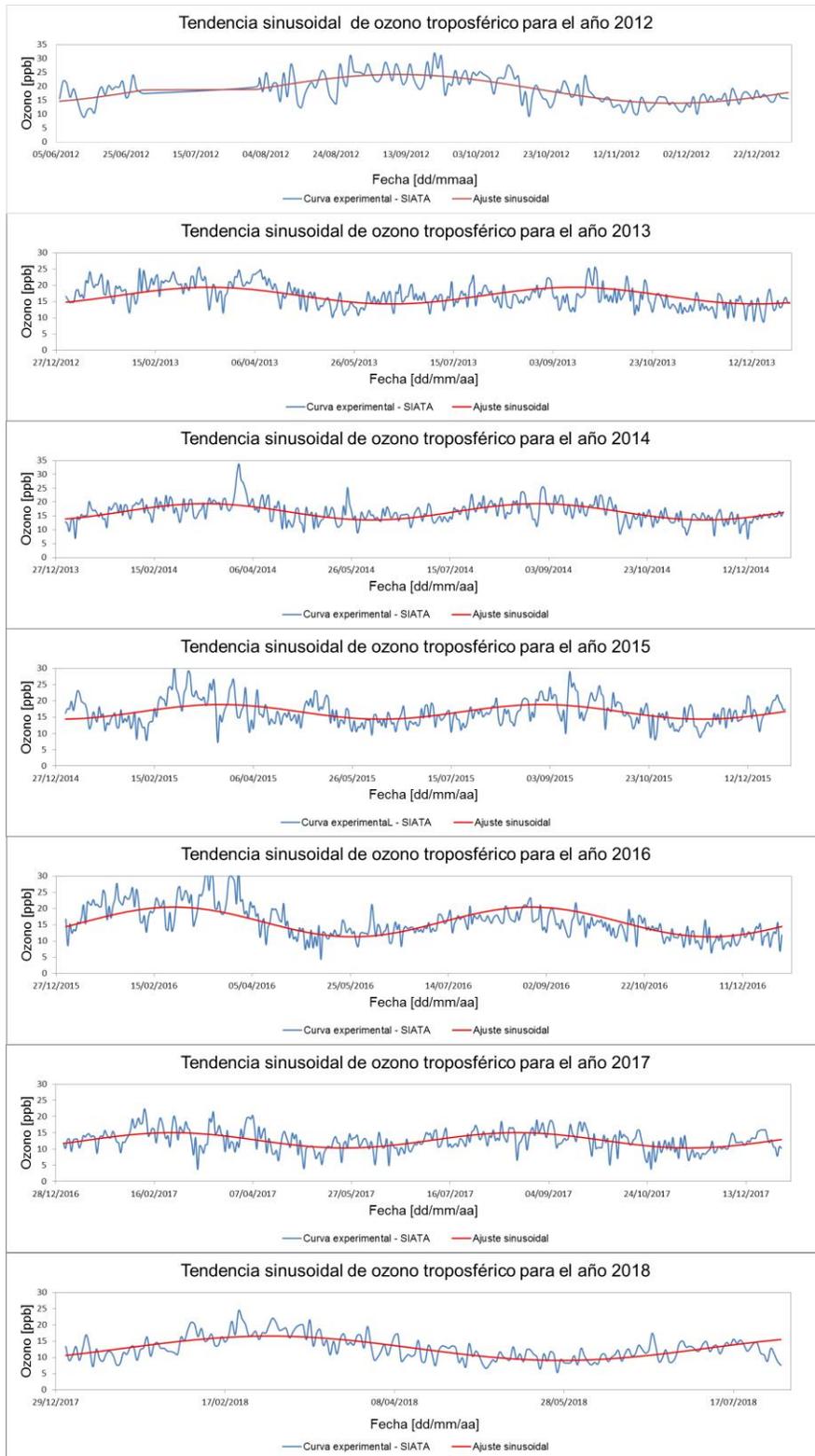


Figura 3.14. Tendencias sinusoidales del O<sub>3</sub> en superficie para los años 2012 al 2018.

**Tabla 3.3.** Generalidades de las curvas de tendencia del ozono en superficie para los años 2012 al 2018.

Año	Tendencia	R <sup>2</sup>	Desviación estándar de los datos experimentales respecto a la curva de tendencia ( $\sigma$ )	Ecuación de tendencia
2012	Sinusoidal	0,51	4,979	$O_3(t) = 19,10303 + 5,16366 \text{ Sen} \left[ \frac{\pi(t - 27,1519)}{78,74909} \right]$
2013	Sinusoidal	0,26	3,4966	$O_3(t) = 16,79515 + 2,56691 \text{ Sen} \left[ \frac{\pi(t - 15,55573)}{91,67249} \right]$
2014	Sinusoidal	0,31	3,62983	$O_3(t) = 16,50305 + 2,9273 \text{ Sen} \left[ \frac{\pi(t - 29,64437)}{84,39275} \right]$
2015	Sinusoidal	0,20	3,9726	$O_3(t) = 16,5717 + 2,256621 \text{ Sen} \left[ \frac{\pi(t - 38,59317)}{81,28708} \right]$
2016	Sinusoidal	0,43	4,89311	$O_3(t) = 15,8512 + 4,57025 \text{ Sen} \left[ \frac{\pi(t - 10,47278)}{91,13166} \right]$
2017	Sinusoidal	0,25	3,20654	$O_3(t) = 12,65264 + 2,3586 \text{ Sen} \left[ \frac{\pi(t - 12,42664)}{87,43412} \right]$
2018	Sinusoidal	0,46	3,60675	$O_3(t) = 12,80398 + 3,73567 \text{ Sen} \left[ \frac{\pi(t - 18,15454)}{85,97758} \right]$

Los datos experimentales se distribuyen uniformemente alrededor de estas curvas de tendencias, por lo cual, para obtener el modelo matemático se adicionó a cada una de ellas un ruido gaussiano (ruido blanco) de amplitud determinada por desviación estándar de los datos experimentales respecto a la curva de tendencia,  $\sigma$ . El modelo resultante se puede expresar de manera general como:

$$O_3(t) = O_{3,0} + A \text{ Sen} \left[ \frac{\pi(t-x_c)}{w} \right] + \text{white\_noise}[\sigma] \quad (14)$$

donde  $O_{3,0}$  representa el valor de corte con el eje vertical (un valor de offset);  $A$  representa la amplitud;  $x_c$  se relaciona con un corrimiento de fase; y  $w$  representa la mitad del periodo.

El segundo modelamiento se realizó a partir de las correlaciones mostradas en las figuras 3.11. y 3.13. La tabla 3.4. resume las generalidades de dichas correlaciones, en ella se han tomado (para el caso de los promedios mensuales) las correlaciones de los meses de poca nubosidad en el valle.

Las funciones de correlación mostradas en la tabla 3.4. representan los modelos matemáticos que describen el ozono en superficie como una función del ozono total en columna troposférica en la zona urbana del Valle de Aburrá. Estos modelos se pueden expresar de manera general como:

$$O_3(x) = B * x + A \quad (15)$$

donde  $B$  representa la pendiente de la recta;  $A$  el intercepto con el eje vertical; y  $x$  el contenido total de  $O_3$  en columna troposférica en el Valle de Aburrá.

**Tabla 3.4.** Generalidades de las curvas de tendencia del ozono en superficie para los años 2012 al 2018.

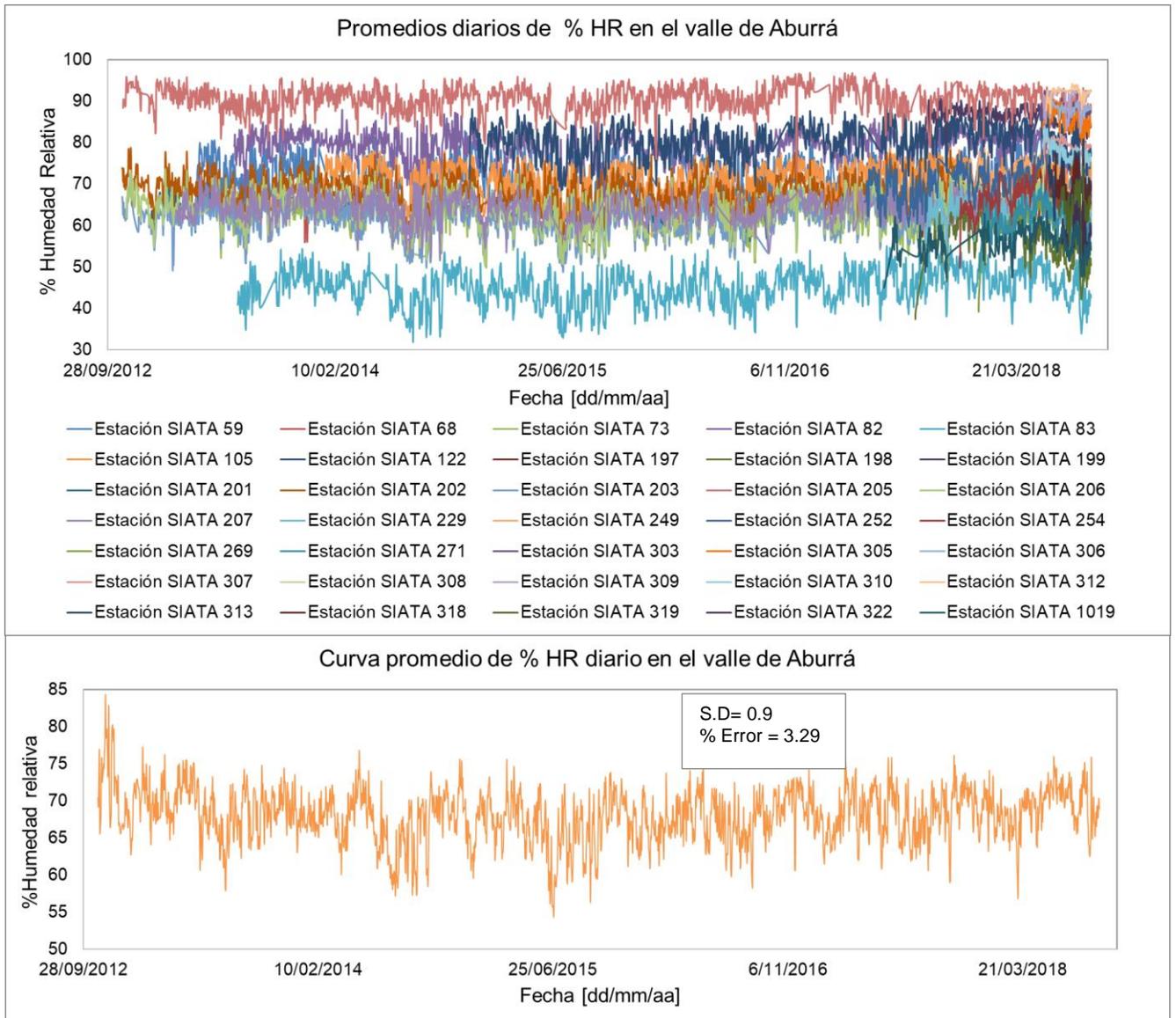
Año	Tipo de correlación	Caso promedios diarios		Caso promedios mensuales	
		R <sup>2</sup>	Ec. de correlación	R <sup>2</sup>	Ec. de correlación
2012	Lineal	0,30	$O_3(O_{3,OMI}) = 1,4305 * O_{3,OMI} - 15,214$	0,69	$O_3(O_{3,OMI}) = 1,7034 * O_{3,OMI} - 21,705$
2013	Lineal	0,15	$O_3(O_{3,OMI}) = 0,5221 * O_{3,OMI} + 3,4364$	0,49	$O_3(O_{3,OMI}) = 0,5352 * O_{3,OMI} + 3,1175$
2014	Lineal	0,18	$O_3(O_{3,OMI}) = 0,6878 * O_{3,OMI} - 0,04412$	0,62	$O_3(O_{3,OMI}) = 0,8135 * O_{3,OMI} - 2,8889$
2015	Lineal	0,03	$O_3(O_{3,OMI}) = 0,2967 * O_{3,OMI} + 9,401$	0,26	$O_3(O_{3,OMI}) = 0,5596 * O_{3,OMI} - 3,0054$
2016	Lineal	0,43	$O_3(O_{3,OMI}) = 1,4015 * O_{3,OMI} - 18,939$	0,90	$O_3(O_{3,OMI}) = 1,7779 * O_{3,OMI} - 27,654$
2017	Lineal	0,11	$O_3(O_{3,OMI}) = 0,6792 * O_{3,OMI} - 3,4199$	0,54	$O_3(O_{3,OMI}) = 1,0647 * O_{3,OMI} - 12,17$
2018	Lineal	0,20	$O_3(O_{3,OMI}) = 0,8829 * O_{3,OMI} - 7,9985$	0,79	$O_3(O_{3,OMI}) = 1,6849 * O_{3,OMI} - 25,446$

Finalmente, para el último modelamiento, se identificaron (a lo largo y ancho del valle) las estaciones SIATA que de manera continua monitorean parámetros meteorológicos, las cuales se listan en la tabla A1 en los anexos. Seguidamente, se descargó el historial de datos disponibles en la plataforma web de SIATA según se listó en la tabla 3.1.

Debido a que los datos meteorológicos tienen una resolución minuta a minuto se procedió a estimar los promedios diarios de cada parámetro para cada una de las estaciones. Luego, como dato representativo de cada variable meteorológica en el valle, se calculó el promedio aritmético entre todas las estaciones, ver figuras 3.15. a 3.18.

Seguidamente, se filtró la selección de datos a correlacionar a aquellos coincidentes con los datos de ozono en fechas de medidas. Las figuras 3.19 y 3.20 muestran las correlaciones para los casos diarios y mensuales respectivamente.

Estas correlaciones se computaron para obtener un modelo matemático simple para la concentración de O<sub>3</sub> en la zona urbana del Valle de Aburrá. La tabla 3.5 resume la información sobre las correlaciones mostradas en la figura 3.19 y en la figura 3.20.



**Figura 3.15.** Promedios diarios y curva promedio de humedad relativa (HR) en cada una de las estaciones que monitorean dicho parámetro desde el año 2012 al 2018.

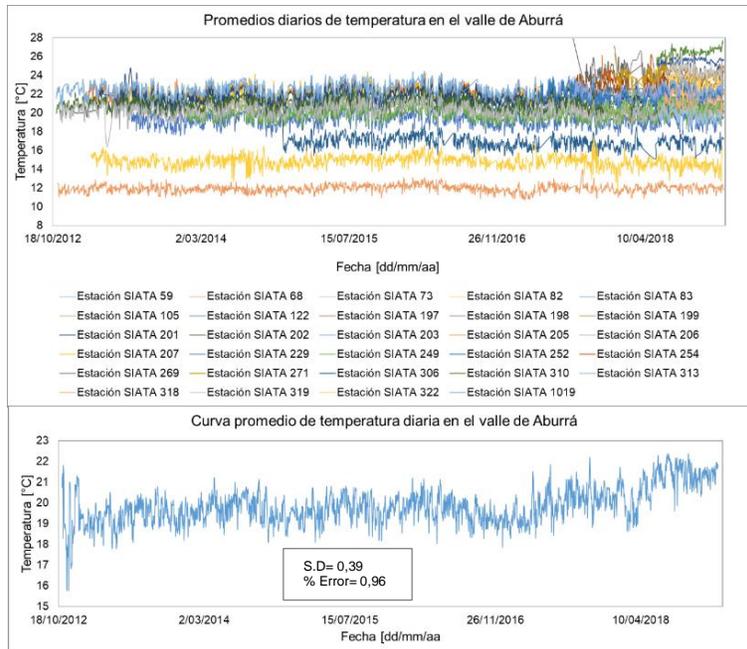


Figura 3.16. Promedios diarios y curva promedio de temperatura (T) en cada una de las estaciones que monitorean dicho parámetro desde el año 2012 al 2018.

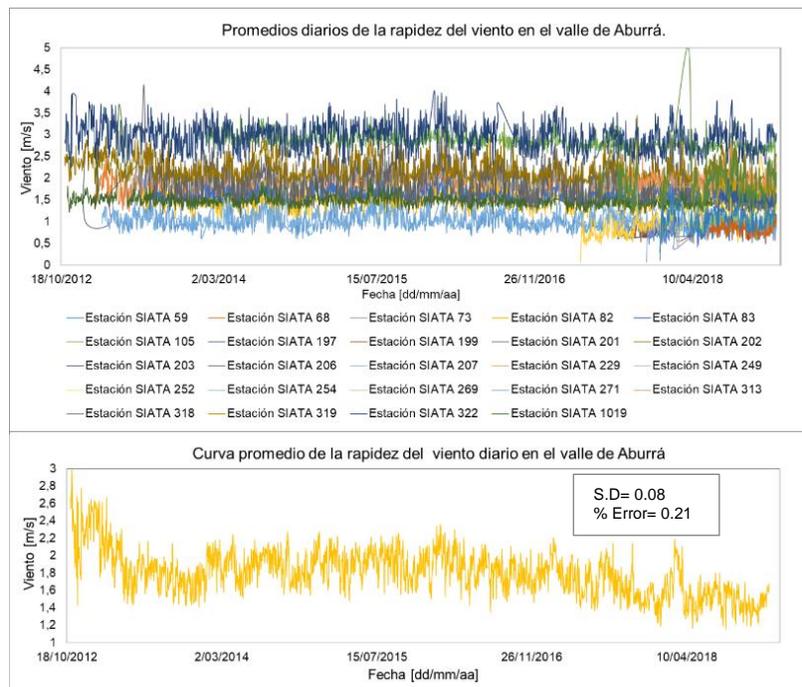
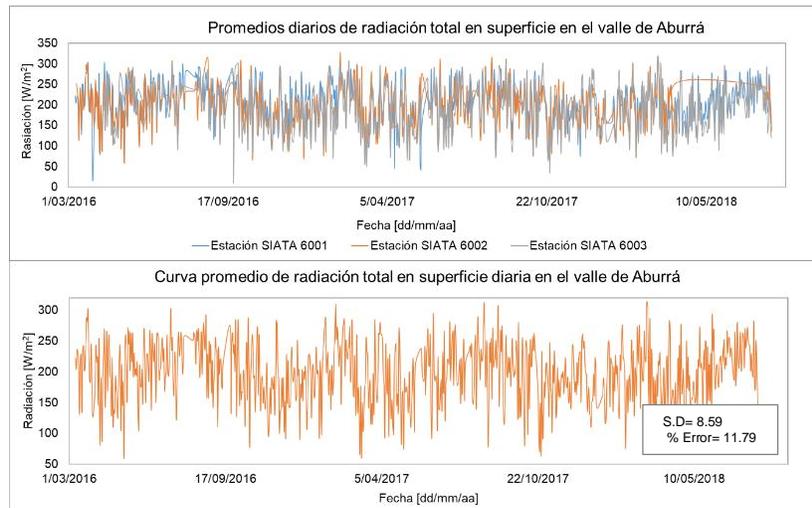
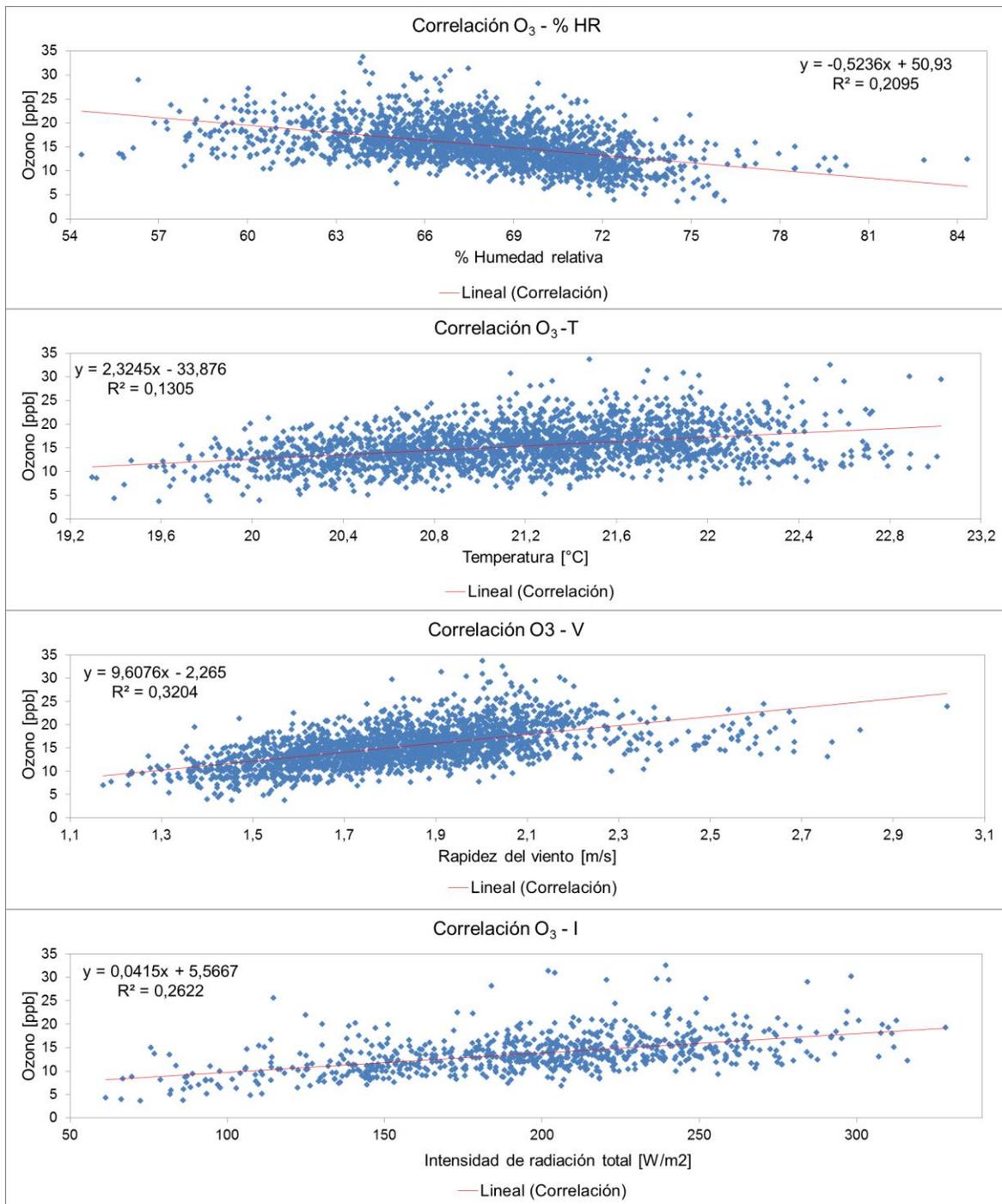


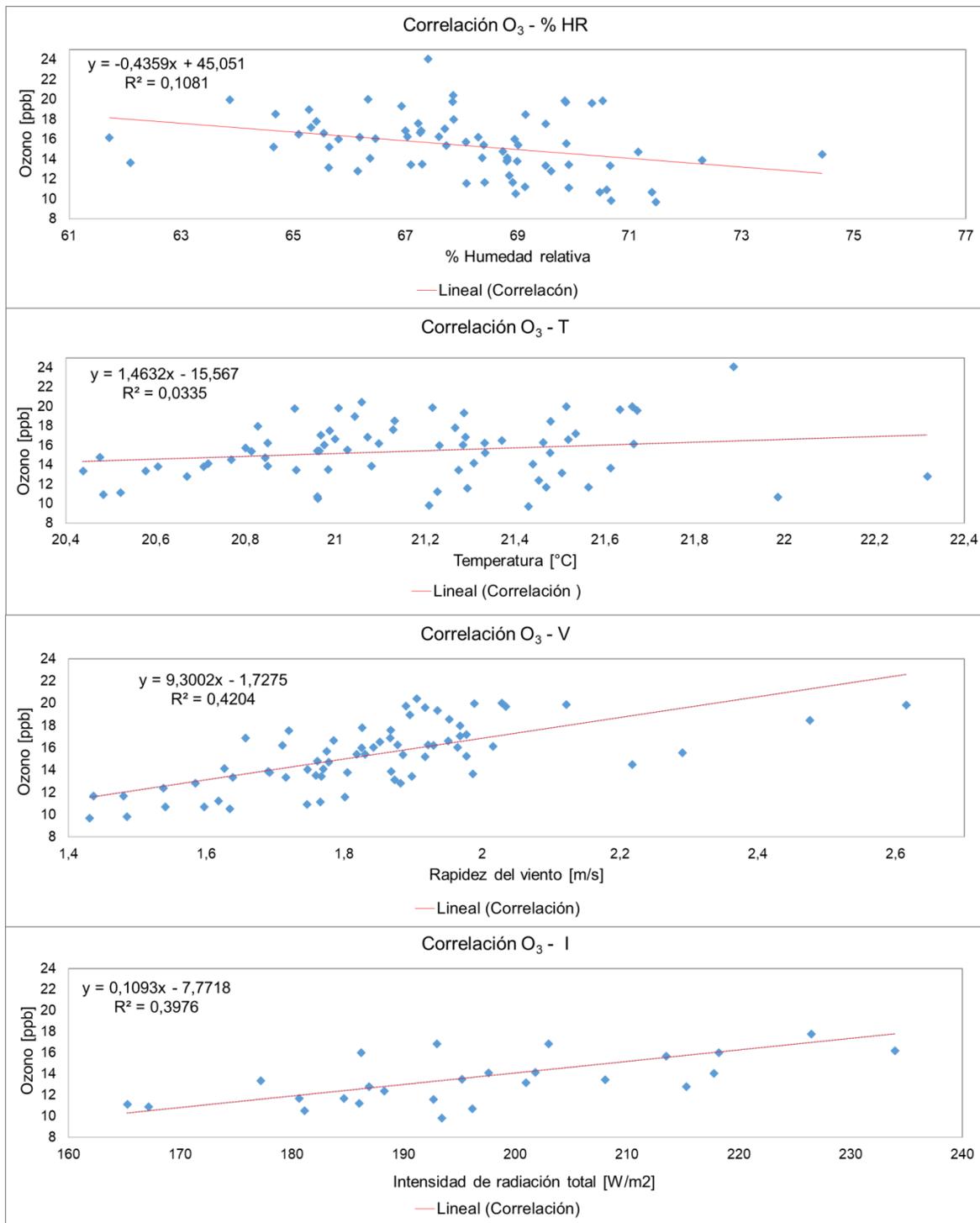
Figura 3.17. Promedios diarios y curva promedio de la rapidez del viento (V) en cada una de las estaciones que monitorean dicho parámetro desde el año 2012 al 2018.



**Figura 3.18.** Promedios diarios y curva promedio de radiación total en superficie (I) en cada una de las estaciones que monitorean dicho parámetro desde el año 2012 al 2018.



**Figura 3.19.** Correlaciones entre la concentración diaria de ozono en superficie y los promedios diarios de parámetros meteorológicos: %HR, T, V e I.



**Figura 3.20.** Correlaciones entre la concentración mensual de ozono en superficie y los promedios mensuales de parámetros meteorológicos: %HR, T, V e I.

**Tabla 3.5.** Resumen general de las correlaciones entre el ozono en superficie y los parámetros meteorológicos.

Parámetros Correlacionados	Tipo de correlación	Caso promedios diarios		Caso promedios mensuales	
		R <sup>2</sup>	Ec. de correlación	R <sup>2</sup>	Ec. de correlación
O <sub>3</sub> [ppb] - %HR	Lineal	0,21	$f(HR) = -0,5236 HR + 50,93$	0,11	$f(HR) = -0,4359 HR + 45,051$
O <sub>3</sub> [ppb] - T [°C]	Lineal	0,13	$h(T) = 2,3245 T - 33,876$	0,03	$h(T) = 1,4632 T - 15,567$
O <sub>3</sub> [ppb] - V [m/s]	Lineal	0,32	$s(V) = 9,6076 V - 2,265$	0,42	$s(V) = 9,3002 V - 1,7275$
O <sub>3</sub> [ppb] - I [W/m <sup>2</sup> ]	Lineal	0,26	$u(I) = 0,0415 I + 5,5667$	0,40	$u(I) = 0,1093 I - 7,7718$

Se realizó el producto entre las funciones de correlación reportadas en la tabla 3.5. y se resolvió la ecuación resultante para la variable ozono, en los casos de promedios diarios y mensuales respectivamente. El modelo resultante se encuentra expresado en la ecuación (16):

$$O_3(HR, T, V, I) = C * [f(HR) * h(T) * s(V) * u(I)]^{1/4} \quad (16)$$

donde  $C$  es un factor de escala y  $f(HR)$ ,  $h(T)$ ,  $s(V)$  y  $u(I)$  son las funciones de correlación reportadas en la tabla 3.5.

## Capítulo 4

### 4.1. Resultados y Discusión

Se realizó un estudio general del contenido de ozono en el volumen de atmósfera definido por la troposfera de la zona urbana del Valle de Aburrá, basado en la descripción de la distribución y dinámica que este gas traza típicamente muestra en esta zona del país. Este estudio involucró el análisis y correlación entre la información in-situ y remota gratuitamente suministrada por las entidades SIATA y NASA respectivamente, en el periodo comprendido entre los años 2012 a 2018.

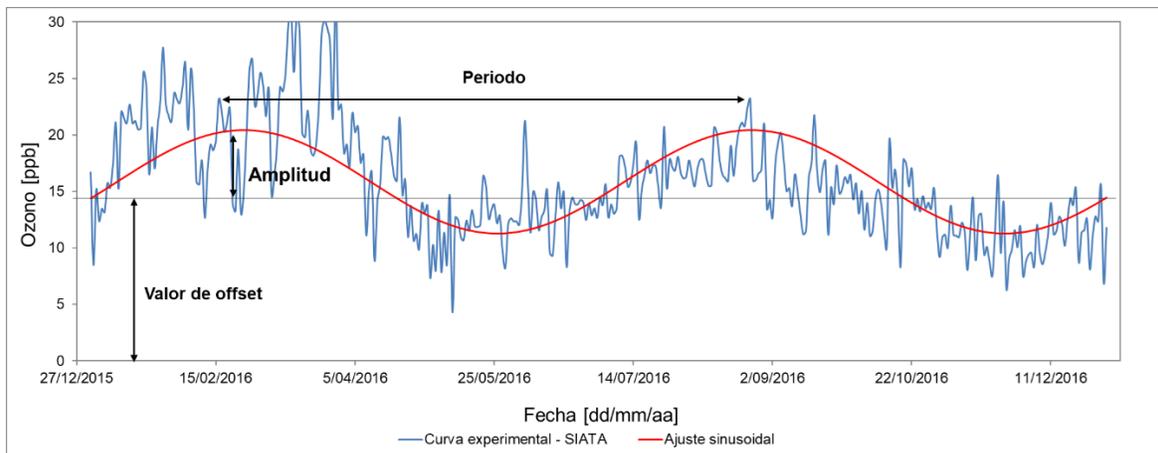
La información que del contenido de ozono en este Valle se obtuvo desde SIATA y NASA, mostró que, bajo una primera aproximación, este gas se encuentra uniformemente distribuido a lo largo y ancho (distribución horizontal) de esta región. Esto se visualizó a partir del análisis de los datos involucrados en las figuras 3.2, 3.5 y 3.7, de los cuales se establece que la concentración promedio diaria de ozono en superficie oscila alrededor de 14,94 ppb; el valor promedio del máximo relativo en el perfil troposférico fluctúa alrededor de 8,29 U.D; y que la altura promedio de estos máximos se encuentra alrededor de 7,24 km. La tabla 4.1 resume estos resultados.

**Tabla 4. 1.** Valores promedios para la distribución horizontal de ozono en la zona urbana del Valle de Aburrá.

		Valores promedios		
		O <sub>3</sub> (ppb)	Max O <sub>3</sub> (U.D)	Altura Max (km)
Estaciones SIATA referentes	3	13,47	8,29	7,25
	25	12,28	8,27	7,19
	31	17,16	8,30	7,35
	37	14,74	8,29	7,18
	38	19,48	8,30	7,32
	40	15,14	8,29	7,25
	41	14,58	8,28	7,28
	43	13,09	8,28	7,15
	44	14,55	8,29	7,15
Promedio entre todas las estaciones SIATA	Valor promedio	14,94	8,29	7,24
	Desviación estándar	3,78	0,62	0,69
	% Error relativo	1,49	0,21	0,25

Contrario a la uniformidad observada en la distribución horizontal del ozono, en su distribución en columna atmosférica (vertical) se identifican dos máximos relativos, uno ubicado en la tropósfera y otro en la estratósfera, según lo muestra la figura 3.4. Se observa claramente que el contenido de ozono en la estratosfera (común mente denominado capa de ozono) es mucho mayor que en la troposfera. Referidos solo a la troposfera, los valores promedios de estos máximos y su ubicación en altura se han resumido en la tabla 4.1.

Haciendo referencia a la dinámica del ozono troposférico en el Valle de Aburrá durante el periodo involucrado en esta investigación, las figuras 3.3, 3.8 y 3.9 describen las tendencias en el tiempo que este gas traza exhibe. El análisis de estas tendencias se restringió a los datos obtenidos en superficie, debido a que su cuantificación no está sujeta a las diversas variabilidades climáticas. La figura 3.14 y la tabla 3.3 detallan estas tendencias para cada año involucrado en este estudio. En la figura 3.14 se aprecian ciclos de oscilación anual con periodos de máximos y mínimos relativos cuyas características matemáticas se describen bastante bien con funciones sinusoidales; se puede apreciar en ellas que los máximos relativos ocurren típicamente alrededor de los meses de marzo y septiembre, meses con abundante presencia de nubes bajas; los valores mínimos para la concentración de  $O_3$  en superficie ocurren regularmente alrededor de los meses de junio y diciembre, meses caracterizados por una escasa presencia de nubes en la atmósfera del Valle y tipificados como meses secos.



**Figura 4.1.** Tendencia sinusoidal del ozono troposférico medido en superficie.

Se distingue entonces una oscilación armónica en el contenido de  $O_3$  troposférico en el Valle de Aburrá, como se representa de manera general en la figura 4.1, con un periodo aproximado de 180 días (seis meses), una amplitud promedio de oscilación de 3,37 ppb y un valor de tendencia promedio (offset) de 15,75 ppb. En la tabla 4.2 se detallan con mayor precisión estos parámetros.

**Tabla 4.2.** Tendencias promedias en la oscilación dinámica del O<sub>3</sub> troposférico en el Valle de Aburrá, desde el año 2012 al año 2018.

<b>Año</b>	<b>Valor de tendencia promedio (ppb)</b>	<b>Amplitud (ppb)</b>	<b>Periodo (días)</b>
2012	19,10	5,16	157,5
2013	16,79	2,57	183,3
2014	16,50	2,93	168,9
2015	16,57	2,26	162,6
2016	15,85	4,57	182,3
2017	12,65	2,36	174,9
2018	12,80	3,74	172
<b>Promedio</b>	15,75	3,37	171,6

Ahora, según lo mencionado anteriormente, tanto las mediciones satelitales como las in-situ describen una dinámica muy similar en cuanto al contenido de O<sub>3</sub> en la tropósfera del valle, lo cual plantea la posibilidad de establecer un relacionamiento entre estas dos cuantificaciones. Para ello se buscó establecer correlaciones entre las tendencias de dichas medidas, a diferentes escalas de tiempo: para promedios diarios y mensuales respectivamente. Un primer análisis muestra que, durante los primeros meses del año, de enero a abril, las mediciones satelitales difieren significativamente de las in-situ, no así, para el resto de meses en el año. Esto puede fácilmente visualizarse en la figura 3.12. Situación previsible si se tiene en cuenta que, a diferencia de las mediciones in-situ en la superficie del valle, las medidas satelitales se ven drásticamente afectadas por las variabilidades climatológicas y por la cobertura nubosa en esta región del país. Debe recordarse, en este punto, que la técnica mediante la cual el instrumento OMI a bordo del satélite Aura logra cuantificar el contenido de O<sub>3</sub> en la columna de atmósfera está supeditada a la cantidad de luz que la superficie de la tierra logra reflejar al espacio exterior, la cual puede ser parcial o totalmente atenuada según las condiciones meteorológicas y climáticas en el valle. En el Valle de Aburrá, durante los primeros meses del año se aprecian drásticos cambios meteorológicos al experimentarse una rápida transición de una temporada seca, que puede extenderse hasta mediados del mes de febrero, a una temporada caracterizada por una constante presencia de nubes e intermitentes episodios de lluvia que alcanzan su clímax alrededor del mes de marzo; lo cual, además de propiciar episodios de extrema contaminación al interior de valle, disminuye la cantidad de radiación que desde la tropósfera se alcanza a detectar en el satélite Aura.

Manteniendo presente esta fenomenología, es de esperarse que las correlaciones realizadas muestren un mayor grado de ajuste si se suprimen los datos correspondientes a los meses de enero a abril, tal como se muestra en la figura 3.13., donde en el lado derecho de la misma se aprecian las correlaciones entre las mediciones de O<sub>3</sub> in-situ y remotas sin tener en cuenta los datos asociados a dichos meses. Un paralelo entre las diferentes escalas de análisis realizadas se resume en la tabla 4.3, donde se aprecia cómo el coeficiente de correlación R<sup>2</sup> se incrementa significativamente si se suprimen los datos de los primeros meses del año.

**Tabla 4.3.** Generalidades de resultados de correlación de promedios diarios y mensuales de ozono troposférico medido de manera in-situ y remota.

Año	Tipo de correlación	Escala de promedios diarios		Escala de promedios mensuales			
		Número de datos	R <sup>2</sup>	Para todos los meses		Para los meses de baja nubosidad	
				Número de datos	R <sup>2</sup>	Número de datos	R <sup>2</sup>
2012	Lineal	157	0,28	--	--	6	0,69
2013	Lineal	315	0,15	12	0,0006	8	0,49
2014	Lineal	317	0,18	12	0,05	8	0,62
2015	Lineal	323	0,03	12	0,016	8	0,26
2016	Lineal	308	0,43	12	0,09	8	0,9
2017	Lineal	323	0,11	12	0,004	8	0,53
2018	Lineal	189	0,2	7	0,08	3	0,79
<b>Promedio</b>	--	276	0,20	11,17	0,04	7	0,61

Algo que hasta el momento no se ha mencionado es que, los cambios en los parámetros meteorológicos y climatológicos característicos al interior de Valle no solo afectan los valores del contenido de O<sub>3</sub> cuantificado desde el satélite, sino que, también repercuten sobre las mediciones in-situ realizadas en superficie por las estaciones SIATA, siendo estos cambios, quizá, las razones de las tendencias sinusoidales anteriormente descritas. Se debe focalizar la discusión en este punto en el hecho de que, debido al balance radiactivo tierra-atmósfera, la dinámica de todos los constituyentes atmosféricos se encuentra estrechamente ligada a la cantidad de radiación solar que logra penetrar hasta su superficie del valle.

La atmósfera del Valle es ampliamente transparente a la radiación electromagnética proveniente del sol, así, gran parte de ella logra atravesarla y alcanza la superficie de la tierra. En contraste la superficie terrestre es opaca a la radiación solar y consecuentemente la mayor parte de ésta es absorbida provocando un calentamiento de la superficie. Ésta reemite este calor en forma de radiación electromagnética infrarroja, parte de la cual escapa de la atmósfera al espacio exterior y otra es retenida por ella. De esta manera la atmósfera es calentada desde su parte más baja en lo que se denomina un proceso convectivo. En un día típico, cuando el sol aparece en la mañana, la atmósfera empieza a calentarse desde su parte más baja dando lugar a la turbulencia y a los movimientos convectivos en un proceso de expansión atmosférica. En el atardecer el flujo de calor desde la superficie cesa y se da inicio a un proceso de compresión atmosférica en el que los diferentes constituyentes tienden a posicionarse cerca de la superficie de la tierra. Este ciclo diurno tiene repercusiones sobre la cantidad relativa de gases y partículas presentes en la atmósfera (que de forma directa e indirecta determinan las características meteorológicas del Valle) y marca la tendencia en ciclos semanales, mensuales y anuales de los mismos. Si a esto se le adiciona la consideración de que la cantidad de radiación que penetra hasta la superficie del Valle fluctúa de acuerdo a lo observado en la figura 3.18, entonces es de esperarse también que el contenido de COV presentes en la atmósfera y por ende el de O<sub>3</sub> presenten ciclos diurnos, semanales, mensuales y anuales.

Entonces, en busca de una explicación fenomenológica de las tendencias del contenido de O<sub>3</sub> en superficie, se establecieron correlaciones entre dicho contenido y algunos parámetros meteorológicos tales como la humedad relativa, la temperatura, la rapidez del viento y la radiación total en superficie, que de alguna manera influyen en su formación. Ver figuras 3.19. y 3.20. Un resumen de los resultados de dichas correlaciones se aprecia en la tabla 4.4.

**Tabla 4.4.** Resultados de correlación entre ozono en superficie y algunos parámetros meteorológicos.

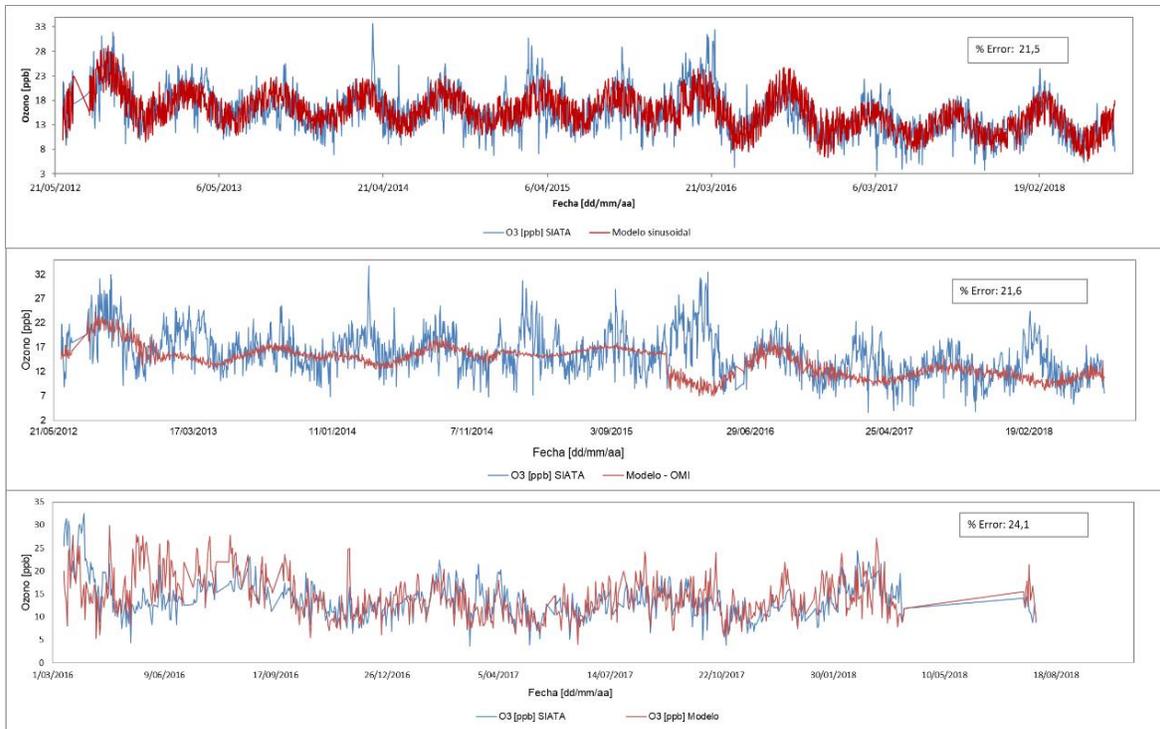
Parámetros meteorológicos	Tipo de correlación	Coeficiente de correlación R <sup>2</sup>	
		Caso promedios diarios	Caso promedios mensuales
% HR	Lineal	0,21	0,11
T	Lineal	0,13	0,03
V	Lineal	0,32	0,42
I	Lineal	0,26	0,4

De esta manera, de las tendencias observadas para el gas traza objeto de este trabajo y de las diferentes correlaciones que se buscaron tanto con mediciones satelitales y con parámetros meteorológicos, como un primer intento hacia la descripción adecuada las tendencias del O<sub>3</sub> en la zona urbana del Valle de Aburrá, se obtuvieron los modelos reportados en las ecuaciones (14), (15) y (16). Los cuales se resumen en la tabla 4.5.

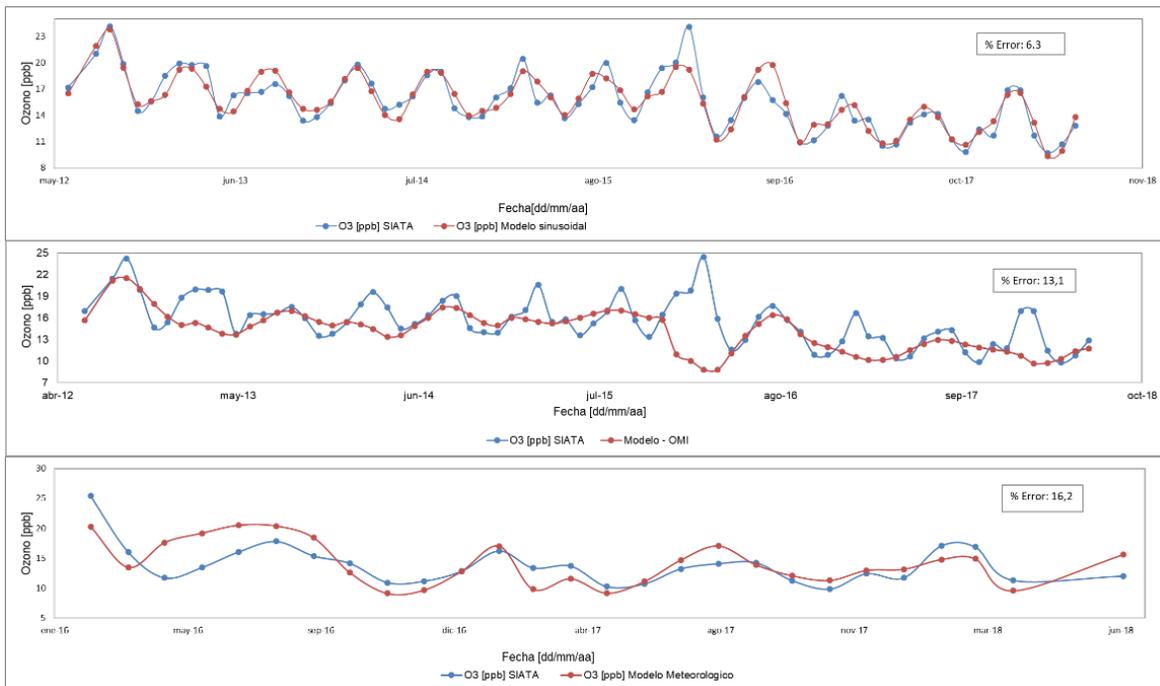
**Tabla 4.5.** Modelos de primera aproximación para la tendencia del O<sub>3</sub> en superficie en la zona urbana del Valle de Aburrá.

Modelo	Descripción
$O_3(t) = O_{3,0} + A \operatorname{Sen} \left[ \frac{\pi(t - x_c)}{w} \right] + \text{white\_noise}[\sigma]$	Curva de mejor ajuste a los datos de concentración promedio diaria de O <sub>3</sub> en superficie.
$O_3(x) = B * x + A$	O <sub>3</sub> en superficie como una función del contenido total de O <sub>3</sub> en columna troposférica.
$O_3(HR, T, V, I) = C * [f(HR) * h(T) * s(V) * u(I)]^{1/4}$	O <sub>3</sub> como una función de parámetros meteorológicos (HR, T, V, I)

Los modelos relacionados en la tabla 4.5. se evaluaron para los promedios diarios y mensuales de O<sub>3</sub> en el Valle de Aburrá. Las figuras 4.2 y 4.3 muestran estos resultados.

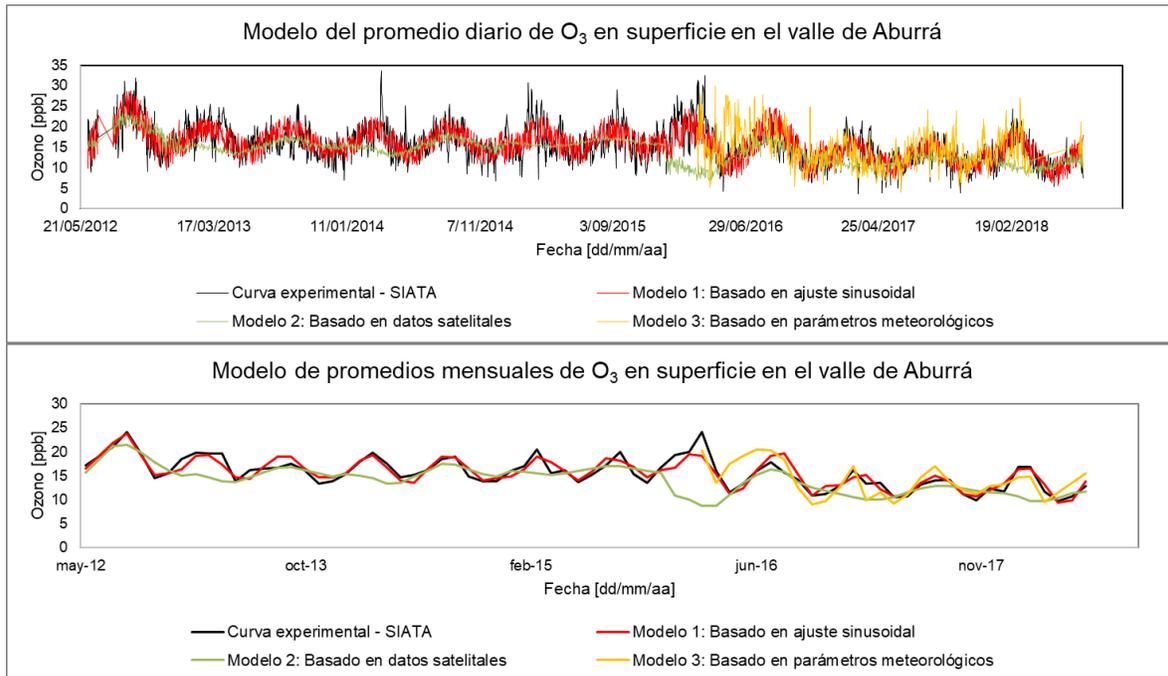


**Figura 4.2.** Modelos evaluados para los promedios diarios.



**Figura 4.3.** Modelos evaluados para los promedios mensuales.

Finalmente, se realizó una comparación entre modelos, como se muestra en la figura 4.4.



**Figura 4.4.** Comparación entre modelos para la tendencia del O<sub>3</sub> en el Valle de Aburrá. Arriba: para los promedios diarios; Abajo: Modelos evaluados para los promedios mensuales.

Se puede establecer, de la figura 4.4, que el modelo matemático sinusoidal se ajusta mejor a los datos experimentales. El modelo obtenido de la correlación con los datos satelitales se ajusta bien a los resultados experimentales en aquellos meses en los que la presencia de nubes en el Valle no es constante. El modelo que menos se ajusta a lo observado experimentalmente por SIATA es aquel derivado de las correlaciones con parámetros meteorológicos, no significando esto que dichos parámetros no influyen en el proceso de formación y en la cantidad de O<sub>3</sub> presente en la región, sino que sugiere que las aproximaciones establecidas para ello en este trabajo deben ser reevaluadas y realizadas con mayor rigor. La tabla 4.6 resume los errores relativos asociados a las aproximaciones en cada modelo.

**Tabla 4.6.** Errores relativos asociados a las aproximaciones en cada modelo propuesto para el contenido de O<sub>3</sub> en superficie en la zona urbana del Valle de Aburrá.

	<b>Modelo</b>	<b>% Error</b>
<b>Para promedios diarios</b>	Modelo1: Sinusoidal	21,5
	Modelo2: OMI	21,6
	Modelo 3: Meteorológico	24,1
<b>Para promedios mensuales</b>	Modelo 1: Sinusoidal	6,3
	Modelo 2: OMI	13,1
	Modelo 3: Meteorológico	16,2

## Capítulo 5

### 5.1. Conclusiones

Se realizó un completo análisis y descripción del contenido de O<sub>3</sub> en el volumen de atmósfera definido por la troposfera en la zona urbana del Valle de Aburrá, en el periodo comprendido desde junio de 2012 a julio de 2018, a partir de registros de medición remota realizados con el instrumento OMI a bordo del satélite Aura de la NASA y de mediciones in-situ registradas con las estaciones SIATA estratégicamente distribuidas en el valle.

De acuerdo a la información obtenida in-situ y remotamente, se describió la distribución y dinámica que este gas traza exhibe en esta región. Se identificó que, bajo una primera aproximación, el ozono troposférico se encuentra uniformemente distribuido a lo largo y ancho del valle. No obstante, su distribución vertical o en columna atmosférica exhibe máximos relativos tanto en la tropósfera como en la estratósfera, definiendo una heterogeneidad en esta distribución.

Respecto a la tendencia en el tiempo que la concentración de este gas describe, se percibieron oscilaciones cuyos ciclos y amplitudes se supeditan a procesos físicos y meteorológicos característicos a la climatología al interior del valle. Fue así como se observó que los procesos radiactivos que determinan el balance radiactivo tierra-atmósfera en esta región del planeta rigen la dinámica de los diferentes constituyentes atmosféricos en las diversas escalas temporales analizadas en este trabajo. De esta manera los máximos y mínimos relativos observados en la tendencia de este gas coinciden con el acontecimiento de meses de mucha y poca nubosidad (húmedos y secos) en el valle, respectivamente, con un periodo promedio de repetición de 180 días (6 meses).

Se establecieron tres modelos simples (o de primera aproximación) que permiten describir adecuadamente dicha tendencia temporal del ozono, tanto para los promedios diarios como para los mensuales de la concentración de este gas en superficie. El primero de estos modelos se obtuvo a partir de la curva de mejor ajuste a los datos experimentales (registrados por SIATA), resultando una curva del tipo sinusoidal. El segundo de estos modelos se obtuvo a partir de la correlación que se observó entre las mediciones in-situ y satelitales, resultando la concentración de ozono en superficie como una función lineal del contenido de ozono en columna troposférica cuantificado remotamente. El último de estos modelos se obtuvo a partir de las correlaciones que el ozono en superficie mostró con parámetros meteorológicos locales como la humedad relativa, la temperatura, la rapidez del

viento y la intensidad de radiación total en superficie, resultando un modelo de raíz cuarta del producto de estas correlaciones.

La comparación de los resultados arrojados por cada modelo reportado en esta tesis mostró que el modelo que mejor se ajusta a la tendencia en el tiempo de la concentración de O<sub>3</sub> en la superficie de la zona urbana del Valle de Aburrá (según los registros o datos experimentales reportados por SIATA) es el modelo de la curva de mejor ajuste, la cual describe muy bien el comportamiento de este gas mediante tendencias sinusoidales.

Finalmente, la realización de esta tesis ha permitido un primer acercamiento de la comunidad académica del TdeA hacia las técnicas de teledetección y al análisis de las mediciones que desde ellas se puede hacer respecto a la calidad el aire local. Se mostró que es posible utilizar y aprovechar la información satelital, disponible en forma gratuita en plataformas como las de NASA, para realizar estudios y diagnósticos relacionados con la calidad el aire en el Valle de Aburrá.

## 5.2. Perspectivas

Se debe continuar con la tarea de buscar nuevos y mejores métodos de correlación entre las mediciones atmosféricas realizadas in-situ y remotamente, en procura de profundizar, con mayor precisión y detalle, en los procesos físicos y químicos que los diversos constituyentes atmosféricos, como los gases traza y los aerosoles, desempeñan en esta región. En este sentido, se espera que la metodología y los resultados expuestos en este trabajo sirvan como punto de partida y referente para que la comunidad académica del Tecnológico de Antioquia, especialmente los estudiantes del programa de Ingeniería Ambiental, se apropien de los principios científicos y técnicos relacionados con las técnicas de teledetección orientadas a estudios atmosférico, en procura de utilizarlas como herramientas complementarias para el monitoreo y diagnóstico de la calidad del aire a escala regional y nacional.

Se espera también que, en el Tecnológico de Antioquia, se dé inicio a una dinámica de colaboración y trabajo conjunto con otros grupos de investigación dentro de la institución, fortaleciendo la investigación en los grupos ligados al programa de Ingeniería Ambiental.

Desde el punto de vista social, se espera poder establecer lazos de colaboración institucional con las entidades locales encargadas actualmente del monitoreo, diagnóstico e implementación de políticas de control y prevención de emergencias ambientales, como lo es SIATA, en pro de complementar los estudios e investigaciones que desde esa entidad se vienen desarrollando en cuanto a la calidad del aire local. Estos lazos permitirán a las autoridades locales mejorar sus políticas de acción ante casos de extrema contaminación ambiental en pro del beneficio de la comunidad.

## REFERENCIAS

Botero, E. U. (12 de 2015). Estudios del cambio climático en América Latina . *El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina* . Naciones Unidas : [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39855/S1501295\\_en.pdf;jsessionid=866D370CDA8C6BA3A4E780F18E69204F?sequence=1](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39855/S1501295_en.pdf;jsessionid=866D370CDA8C6BA3A4E780F18E69204F?sequence=1).

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (03 de 2014). Quinto Informe Nacional de Biodiversidad de Colombia ante el Convenio de Diversidad Biológica. *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo* . Bogotá, D.C, Colombia.

FAO . (2 de 12 de 1997). La agricultura y los cambios climáticos: la función de la FAO .

Bedoya, J., & Elkin , M. (2018). Calidad del aire en el valle de Aburrá Antioquia - Colombia. *Dyna* , 76 (158), 7-15.

Ramón, J. D., & Ramón, J. A. (06 de 2015). Estudio de parámetros de calidad del aire en una zona urbana, industrial y rural. . *Redalyc* , 20-27 .

Romero, F. S. (Junio de 2006). La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental . *AquíaTIC* , 13-41.

Wallace, J., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric Science* . (J. Helé, Ed.) Washington : ELSEVIER .

Platt, U., & Stutz, J. (2008). *Differential Optical Absorption Spectroscopy* . Estados Unidos : Springer - Verlag Berlin Heidelberg .

Kovalev V, E. W. (2004). *Elastic Lidar: Theory, Practice and Analysis Methods* . Wiley .

Lusi, A. R. (2017). *Impacto del agujero de ozono sobre la radiación UV en latitudes medias y altas*. Buenos Aires ARGENTINA: CEILAP.

Lacouture, C. (1979). *Estudio de la contaminación ozono, dióxido de nitrógeno y formaldehído como agentes de contaminación atmosférica*. Tesis en ingeniería civil. Pontificia Universidad Javeriana.

Spedding, D. J., García, S. G., & Gutiérrez, J. N. (2002). *Contaminación atmosférica* . Barcelona : Editorial Reverté, S.A.

Hartmann, D. A. (2013). Observations: Atmosphere and Surface. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth

Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Borsese, A., & Esteban, S. (2005). Química, Educación ambiental y vida cotidiana : el ozono troposférico . *Enseñanzas de la Ciencia* .

Grajales, J. F. (2011). *Tesis de maestría. Inferencia de Concentraciones en Superficie de O3 y NO2 a Partir de Columnas Troposféricas del Instrumento de Medición OMI para Colombia*. Universidad Nacional de Colombia , Geociencias . Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.

MARM; CIEMAT. (2007). *El ozono troposférico y sus efectos en la vegetación*.

Ataz, E. M., & Morales, Y. D. (2004). *Contaminación Atmosférica*. Universidad de Castilla la Mancha.

Denore, B. J., & García, M. J. (1999). Los satélites de observación de la tierra en el 2000. *Dialnet* , 22.

Cisneros, J. M. (1990). *¿ Como se mide el ozono atmosferico?* Obtenido de [https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/2331/1/TyC\\_1994\\_15\\_04.pdf](https://repositorio.aemet.es/bitstream/20.500.11765/2331/1/TyC_1994_15_04.pdf)

Inzunza, R. A. (2012 ). *Implementación de instrumentación óptica para el monitoreo remoto de la calidad del aire* . Universidad de Concepción , Física . Concepción : Universidad de Concepción .

Huerta, J. A. (2015). Propuesta para establecer un sistema de vigilancia de contaminantes ambientales en Colombia. *Redalyc* .

AMVA. (27 de 03 de 2019). *Area Metropolitana del Valle de Aburrá*. Obtenido de <https://www.metropol.gov.co/Paginas/faq.aspx>

SIATA. (2018). *Informacion de Calidad del Aire*. Obtenido de [https://siata.gov.co/descarga\\_siata/index.php/index2/calidad\\_aire/](https://siata.gov.co/descarga_siata/index.php/index2/calidad_aire/)

Montoya, A. O., & Tamayo, M. A. (2013). Tecnicas de medición de ozono. *Revista Gestion y Ambiente* , 95- 104.

IDEAM. (2018). *Generalidades del ozono*. Obtenido de Meteorología aeronautica - ozonosondeos: <http://www.meteoaeronautica.gov.co/generalidades-del-ozono>

NASA . (5 de june de 2012 ). *The afternoon Constellation* . Obtenido de <https://atrain.nasa.gov>

OMI Team . (5 de January de 2012). Ozone Monitoring Instrument (OMI) Dta User's Guide. 66.

AURA-OMI. (2019). *EARTHDATA*. Recuperado el 22 de 03 de 2019, de <https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets?page=1&keywords=aura>

Gil, N., & Mello, S. d. (2011). *Differential Optical Absorption Spectroscopy* . Principio de medicion atmosferica .

Navarrete, J. C., & Salamanca, J. (2011). Absorción por ozono y dispersión por aire de la radiación solar ultravioleta . *U.D.C.A* , 151-159.

H.E.Rieder. (8 de 01 de 2013). On the relationship between total ozone and atmospheric dynamics and chemistry at mid- latitudes - part 2 : The effects of the El Niño/ Southern Oscillation, volcanic eruptions and contributions of atmospheric dynamics and chemistry to long-term total ozone changes . *Atmospheric Chemistry and physics* , 15.

IDEAM. (2016). *Informe del Estado de la Calidad del Aire en Colombia*. Bogotá,D.C.

Perez, C., Poveda, G., Mesa, O., Carvajal, L. F., & Ochoa, A. (1998). Evidencia de cambio climatico en colombia: tendencia y cambios de fase y amplitud de los ciclos anual y semianual . *Redaly* , 27.

AERONET . (2018 ). Obtenido de [https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new\\_web/index.html](https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/index.html)

NASA . (2018). Obtenido de <https://www.nasa.gov>

ESA. (2018 ). Obtenido de <http://m.esa.int/ESA>

UNAL, C. . (2007). Hoja de vida de equipos . Medellin , Colombia : Universidad Nacional de Colombia .

TEDEDYNE . (2011). MODEL 400E PHOTOMETRIC OZONE ANALYZER . San Diego , California .

Nisperuza, D. J. (2015). *Tesis de doctorado. Propiedades ópticas de los aerosoles atmosfericos en la región andina Colombiana mediante análisis de mediciones remotas: LIDAR, fotométricas y satelitales*. Medellin: Univercidad Nacional de Colombia.

Grajales, J. F. (2011). Inferencia de Concentraciones en Superficie de O3 y NO2 a Partir de Columnas Troposféricas del Instrumento de Medición OMI para Colombia. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.

Arango, J. D., Tobón, C. A., & Mejía, J. F. (2011). Aspectos descriptivos de la circulación en la capa límite atmosférica del Valle de Aburra. *Revista Politécnica* .

## ANEXOS

**Tabla A1.** Listado de estaciones SIATA que monitorean la concentración de O<sub>3</sub> y algunos parámetros meteorológicos en la superficie del Valle de Aburrá.

Estación SIATA	Parámetro monitoreado				
	Ozono	%Humedad relativa	Temperatura	Viento	Intensidad de radiación total
3	x				
25	x				
31	x				
37	x				
38	x				
40	x				
41	x				
43	x				
44	x				
59		x	x	x	
68		x	x	x	
73		x	x	x	
82		x	x	x	
83		x	x	x	
105		x	x	x	
122		x	x	x	
197		x	x	x	
198		x	x	x	
199		x	x	x	
201		x	x	x	
202		x	x	x	
203		x	x	x	
205		x	x	x	
206		x	x	x	
207		x	x	x	
229		x	x	x	
249		x	x	x	
252		x	x	x	
254		x	x	x	
269		x	x	x	
271		x	x	x	
303		x			

305		x			
306		x	x	x	
307		x			
308		x			
309		x			
310		x	x	x	
312		x			
313		x	x	x	
318		x	x	x	
319		x	x	x	
322		x	x	x	
1019		x	x	x	
6001					x
6002					x
6003					x

**Tabla A2.** Especificaciones técnicas de los equipos incorporados en las estaciones SIATA para la cuantificación del O<sub>3</sub> y los parámetros meteorológicos. (UNAL, 2007), (TEDEDYNE , 2011).

<b>Especificaciones de instrumentación</b>				
<b>Nombre</b>	<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Exactitud</b>	<b>Rango de uso</b>
Analizador de ozono	Teledyne Instruments	M 400E	< 0.5 %	0-10.000 ppb
Sensor velocidad del viento	Met One Instruments	010C	1.5%	0-60 m/s o 0-125 mph
sensor humedad relativa/temperatura	Met One Instruments	083E-1-35	2%	0-100% RH Y 50°C A + 50°C
sensor radiación solar	Met One Instruments	096-1	1%	0-2000 W/m <sup>2</sup>

**Tabla A3.** Estructura de los archivos CSV descargados de la plataforma web de SIATA. Sombreado en gris se resaltan las columnas relacionadas con el gas O<sub>3</sub>.

Fecha_Hora	Código Serial	Datos material particulado	O <sub>3</sub>	calidad_O <sub>3</sub>	Datos CO y SO <sub>2</sub>	Datos viento
dd/mm/aa/hh:mm	# Estación	valor e indicador de calidad	valor	1 (dato válido) -9999 ó 151 (dato no válido)	valor e indicador de calidad	valor e indicador de calidad
:	:	:	:	:	:	:

**Tabla A4.** Estructura de los archivos HDF de nivel L2, descargados de la plataforma web de NASA para el instrumento OMI a bordo del satélite Aura.

HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data Fields/APrioriCovarianceMatrix
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data Fields/AerosolOpticalThickness
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data Fields/AveragingKernel
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data Fields/CloudPressure
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data Fields/ColumnAmountO3
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data Fields/CovarianceMatrix
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data
Fields/DegreesOfFreedomForSignal
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data
Fields/EffectiveCloudFractionUV1
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data
Fields/EffectiveCloudFractionUV2
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data
Fields/InstrumentConfigurationId
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data Fields/MeasurementQualityFlags
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data Fields/NO2ColumnAmount
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data Fields/NumberOfIterations
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data Fields/O3
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data Fields/O3Apriori
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data Fields/O3AprioriError
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data Fields/O3Precision
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data Fields/ProcessingQualityFlags
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data Fields/ReflectanceCostFunction
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data Fields/ResidualsOfFit
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data Fields/RootMeanSquareErrorOfFit
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data Fields/SO2ColumnAmount
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data Fields/SmallPixelRadiance
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data
Fields/SmallPixelRadiancePointer
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data
Fields/SmallPixelRadianceVariance
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data Fields/StateCostFunction
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data Fields/StateVectorSpecies
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data Fields/Temperature
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data Fields/TerrainReflectivityUV1
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Data Fields/TerrainReflectivityUV2
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Geolocation Fields/Altitude

HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Geolocation
Fields/GroundPixelQualityFlags
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Geolocation Fields/Latitude
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Geolocation Fields/Longitude
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Geolocation Fields/Pressure
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Geolocation Fields/SolarAzimuthAngle
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Geolocation Fields/SolarZenithAngle
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Geolocation
Fields/SpacecraftAltitude
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Geolocation
Fields/SpacecraftLatitude
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Geolocation
Fields/SpacecraftLongitude
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Geolocation Fields/TerrainHeight
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Geolocation Fields/Time
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Geolocation
Fields/ViewingAzimuthAngle
HDFEOS/SWATHS/O3Profile/Geolocation
Fields/ViewingZenithAngle
HDFEOS INFORMATION/ArchiveMetadata.0
HDFEOS INFORMATION/CoreMetadata.0

## Participación en eventos

- XVIII Encuentro Departamental de Semilleros de Investigación. Concentración de O<sub>3</sub> troposférico en el Valle de Aburrá a partir del análisis de mediciones in-situ y satelitales. Presentación en póster. Mayo 8 al 10 de 2019. Colegio Palermo de San José – Medellín.
- X Workshop on LIDAR Measurements in Latin America. Tropospheric O<sub>3</sub> model from both satellite and in-situ data analysis in the Aburrá valley Colombia. Presentación en póster. Noviembre 19 al 23 de 2018. Universidad Nacional de Colombia – Medellín.