UNIVERSIDAD CATÓLICA DE MANIZALES

Metodología para determinar la cantidad de material particulado en la capa troposfera a partir de teledetección. Área de estudio: Valle de Aburra, Antioquia, para el año 2016.

GERALDINE CASTRO COCA

Universidad Católica de Manizales

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Maestría en Teledetección

Manizales -Caldas

2019

Metodología para determinar la cantidad de material particulado en la capa troposfera a partir de teledetección. Área de estudio: Valle de Aburra, Antioquia, para el año 2016.

GERALDINE CASTRO COCA

Trabajo de Investigación Aplicada presentado como requisito para optar por el título de:

Magister en Teledetección

Director:

Dr. Oscar Cardona Morales

Cotutor:

Dr. Alexander Parra Uzcátegui

Línea de investigación:

Procesamiento de imágenes ópticas

Universidad Católica de Manizales

Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Maestría en Teledetección

Manizales -Caldas

2019

Agradecimientos

A Dios, ser supremo y bondadoso,
a mi abuelita en el cielo.

A mis tutores, Dr. Oscar Cardona y Dr. Alexander Parra por ser guia, por todas sus enseñanzas, por su apoyo e infinita paciencia, los admiro mucho, a el Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), proyecto de la Alcaldía de Medellín y Área Metropolitana del Valle de Aburrá que cuenta con el apoyo y los aportes de EPM e ISAGEN, por los datos brindados usados para realizar la investigación.

A mis padres Nelson y Rosa y a mi hermano Alexander por ser inspiración y fortaleza durante toda mi vida, perdón por todos los momentos familiares sacrificados, y sobre todo gracias por creer en mí, a Gabriel Zambrano por su amor incondicional y paciencia, por acompañarme y apoyarme cuando más lo necesité. ¡Te amo!

A mi prima Carolina Rodríguez por impulsarme y darme ejemplo, por ser luz en medio de la oscuridad, a Mariana mi hermosa sobrina “Por más difícil que sea, no te rindas” de la mano de Dios nada es imposible, y a mis amigas, 16 años contando con su apoyo y cariño, gracias por la fuerza y motivación.

Geraldine Castro C.

Resumen

En la presente investigación se da a conocer una metodología que tiene como objetivo la generación de un modelo empírico para determinar la concentración de partículas de contaminación menores a 10 micras (PM_{10}) en el Valle de Aburrá, Antioquia, en diferentes fechas.

Este estudio se realizó a partir del análisis de las bandas de imágenes satelitales LANDSAT 8 OLI/TIRS (Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor) del año 2016 y las concentraciones de PM_{10} obtenidas de las estaciones de monitoreo de calidad del aire ubicadas en tierra en diferentes zonas del Valle de Aburrá, tomadas de forma simultánea a las fechas de las imágenes; los valores de reflectancia atmosférica de las cinco bandas (aerosol, rojo, verde, azul e infrarrojo cercano) y el PM_{10} de las redes de monitoreo de calidad de aire se correlacionaron obteniendo varios modelos, de los cuales se seleccionaron los que presentaron un coeficiente de correlación (R^2) alto y un error cuadrático medio (RMSE) bajo, el modelo con mejor ajuste se validó en otra imagen obteniendo buenos resultados (R^2=0.963 y RMSE=2.87). Este estudio se realizó atendiendo la necesidad de encontrar nuevas metodologías que permitan el control a diferentes focos de contaminación que se deben mitigar y con esto mejorar la calidad de vida de las personas; el modelo se generó con 4 imágenes de diferentes épocas del año y 6 estaciones de monitoreo de calidad del aire, la mayoría ubicadas en la ciudad de Medellín, se usó una quinta imagen para realizar la validación del mismo; los resultados de la investigación evidenciaron que por medio de las bandas del espectro electromagnético correspondiente a las regiones visibles e infrarrojo cercano de LANDSAT 8 se puede calcular la concentración de PM_{10} y mostró la estrecha relación entre Espesor Óptico de Aerosoles (AOT) y PM_{10}.

Palabras clave: Teledetección, contaminación atmosférica, PM_{10}, Landsat, Valle de Aburra.

Abstract

The current investigation provides a methodology with the purpose of an empirical model generation to determinate the pollution particles concentration less than ten microns (PM_{10}) on Valle de Aburrá, Antioquia, on different dates.

This study was made from bands of satellite images LANDSAT 8 OLI/TIRS (Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor) from 2016 and beside the PM_{10} concentration obtained from the quality air monitoring stations located in land and different Valle de Aburrá zones, taken on a simultaneous way to the images dates. The atmospheric reflectance values of the five bands (aerosol, red, Green, blue and near infrared) and the PM_{10} from quality air monitoring networks were correlated obtaining several models, of which were selected models which presented a high correlation coefficient (R^2) and a low medium squared error (RMSE). The model whit the best result was validated in another image getting good results ($R^2 = 0.963$ Y RMSE = 2.87). This study was made attending the need of find different methodologies which allow the control of pollution sources that must be mitigated to improve people life quality. The model was generated whit 4 images from different seasons of the year and from 6 quality air monitoring stations, the most of these located in Medellin. A fifth image was used to the validation. The investigation results showed that through of the bands of electromagnetic spectrum corresponding to the visible regions and near infrared of LANDSAT 8 can calculate the PM_{10} concentration and showed the close relationship between Aerosol Optical Thickness (AOT) and PM_{10}.

Key words: Remote sensing, air pollution, PM_{10}, Landsat, Valle de Aburra, Antioquia

Contenido

1. Introducción 8
2. Planteamiento del problema 11
2.1. Definición del problema 11
2.2. Pregunta de investigación e Hipótesis 13
2.2.1. Pregunta de investigación. 13
2.2.2. Hipótesis. 13
3. Justificación 15
4. Objetivos 17
4.1. Objetivo General 17
4.2. Objetivos Específicos 17
5. Marco teórico 18
5.1. Generalidades de la teledetección 18
5.1.1. Aplicaciones de la teledetección 21
5.1.2. Landsat 22
5.1.3. Landsat 8 (Landsat Data Continuity Mission) 24
5.2. Atmósfera 27
5.2.1. Características de la atmósfera 27
5.2.2. La troposfera 28
5.3. Contaminación Atmosférica 29
5.3.1. Aerosoles 32
5.3.2. Contaminación del aire a nivel mundial 33
5.3.3. Cambio Climático 34
5.3.4. Normas de control 35
5.4. Contaminación del aire en el valle de Aburra 37
5.5. Medición de material particulado con métodos de teledetección 39
6. Estado del arte 42
6.1. Teledetección a nivel internacional 43
6.2. Teledetección a nivel nacional 47
7. Área de estudio y datos 49
7.1. Área de estudio 49

7.2. Datos (Imágenes) 50
8. Metodología y desarrollo del proyecto 55
8.1. Información Estaciones de Monitoreo de Calidad de aire 57
8.2. Calibración de Imágenes 60
8.3. Generación de Modelos 64
8.4. Técnica de validación 66
9. Resultados 67
10. Validación 73
11. Discusión 78
12. Conclusiones 107
Recomendaciones 108
Bibliografía 109

Índice de tablas

Tabla 1. Bandas Landsat 8 OLI/TIRS 26
Tabla 2. Niveles máximos permisibles de contaminantes de aire 36
Tabla 3.listado de imágenes usadas 50
Tabla 4. Imágenes Landsat 8 Path/Row adquiridas año 2016 usadas en investigación 51
Tabla 5. Listado estaciones de monitoreo con información de PM_{10}. 54
Tabla 6. Listado PM_{10} para cada estación. 58
Tabla 7. Modelos del 14 de enero del 2016 para todas las estaciones 68
Tabla 8. Modelos del 21 de junio del 2016 para todas las estaciones. 69
Tabla 9. Modelos del 28 de octubre del 2016 para todas las estaciones. 70
Tabla 10. Modelos del 5 de mayo del 2016 para todas las estaciones. 71
Tabla 11. Fecha de adquisición imágenes 73
Tabla 12. Validación modelos resultantes con 4 bandas 74
Tabla 13. Validación algoritmos resultantes con 3 bandas. 75
Tabla 14. Índice Calidad del aire (PM_{10}). 80
Tabla 15. Comparación zona de influencia de las estaciones, Imagen 5 de mayo 2016 83
Tabla 16. Comparación resultados PM_{10}, 5 de mayo 2016 84
Tabla 17. Comparación zona de influencia de las estaciones, Imagen 14 de enero 2016 88
Tabla 18. Comparación resultados PM_{10}, 14 de enero 2016 89
Tabla 19. Comparación zona de influencia de las estaciones, Imagen 21 de mayo 2016 93
Tabla 20. Comparación resultados PM_{10}, 21 de mayo 2016 95
Tabla 21. Comparación zona de influencia de las estaciones, Imagen 22 de junio 2016 98
Tabla 22. Comparación resultados PM_{10}, 22 de junio 2016 99
Tabla 23. Comparación zona de influencia de las estaciones, Imagen 28 de octubre 2016 103
Tabla 24. Comparación resultados PM_{10}, 28 de octubre 2016 104

Índice de figuras

Figura 1. Representación satélite Sentinel 2. 19
Figura 2. Primera imagen satelital por Explorer 6. 20
Figura 3. Misiones Landsat 23
Figura 4. Ancho de banda Landsat 7 y Landsat 8. 25
Figura 5. Nomenclatura Landsat 8. 26
Figura 6. Troposfera. 29
Figura 7. Contaminación atmosférica Medellín., Colombia 37
Figura 8. Área de estudio Valle de Aburra, Antioquia 49
Figura 9. Zona de estudio ubicada sobre imagen satelital 52
Figura 10. Estaciones de monitoreo de PM_{10} Valle de Aburrá 53
Figura 11. Esquema metodológico 56
Figura 12. Ubicación grafica estaciones de monitoreo 59
Figura 13. Procesamiento de datos en RStudio 65
Figura 14. Imagen 05 de mayo 2016 79
Figura 15. Imagen 05 de mayo 2016, Clasificada por PM_{10} 81
Figura 16. Imagen 14 de enero 2016 86
Figura 17. Imagen 14 de enero 2016, Clasificada por PM_{10} 87
Figura 18. Imagen 21 de mayo 2016 91
Figura 19. Imagen 21 de mayo 2016, Clasificada por PM_{10} 92
Figura 20. Imagen 22 de junio 2016 96
Figura 21. Imagen 22 de junio 2016, Clasificada por PM_{10} 97
Figura 22. Imagen 28 de octubre 2016 101
Figura 23. Imagen 28 de octubre 2016, Clasificada por PM_{10} 102

Acrónimo

AOD: Profundidad Óptica de Aerosoles

AOT: Espesor Óptico de Aerosoles

MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MP: Material Particulado

PM_{10}: Material Particulado de 10 µm de diámetro

TOA: Parte alta de la atmosfera

ERC: Enfermedad Respiratoria Crónica

EPOC: Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica

OMS: Organización Mundial de la Salud

IDEAM: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales

µm: Micrómetro

(µg/m3): Microgramos por metro cúbico

1. Introducción

La contaminación atmosférica es la presencia de sustancias nocivas en la atmósfera en concentraciones que podrían llegar a provocar daño a los seres humanos. La contaminación del aire por partículas respirables se ha clasificado según su tamaño en PM_{10} y $PM_{2.5}$, las primeras son partículas dispersas en la atmósfera cuyo diámetro es menor a 10 µm generalmente con pH básico producto de la combustión no controlada, las segundas son la fracción respirable más pequeña, constituidas por un diámetro inferior a 2.5 µm (Larsen, 2003). En el año 2012, una de cada nueve muertes fue el resultado de condiciones relacionadas con la contaminación del aire. De esas muertes, alrededor de 3 millones son atribuibles únicamente a condiciones ambientales naturales (al aire libre) (Organization World Health & Others, 2016).

En el departamento de Antioquia, en Medellín para el año 2016 se presentó una aguda crisis de contaminación del aire causada por las altas emisiones de dióxido de carbono que produjeron un ambiente que generó la declaración de contingencia atmosférica por parte de las autoridades ambientales del Área Metropolitana (Medellín comó vamos, 2016), por lo anterior el Área Metropolitana del Valle de Aburrá ha unido sus esfuerzos para controlar y mitigar la contaminación del aire por medio del Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), el cual se encarga de monitorear y cartografiar las diferentes variables ambientales, difusión de la información y educación para fortalecer la gestión de riesgos de la región. Este control se realiza por medio de 12 redes de monitoreo de distintas variables, una de estas es la red de calidad del aire la cual cuenta con 40 estaciones de monitoreo de distintos

contaminantes como el Ozono o el PM_{10} (Mejia Chavarriaga, 2016). Tradicionalmente, para cartografiar el PM_{10} se usan las estaciones de medida en tierra y se realiza una interpolación espacial, así se logra estimar un valor de la concentración de la contaminación en sitios donde no se encuentran ubicadas estaciones de monitoreo (Alias, Hamzah, & Kenn, 2007), teniendo en cuenta que las estaciones no siempre están cerca una de otra y el número es limitado, no es posible determinar una distribución espacial detallada de PM_{10}.

Los sensores remotos ofrecen una fuente de datos muy amplia con la que se puede monitorear y cartografiar material particulado. Diferentes estudios mostraron que los datos satelitales son útiles para detectar y rastrear partículas contaminantes con la ventaja de tener una amplia cobertura tal que proporcionan información cuantitativa con precisión aceptable que es comparable a las mediciones de las estaciones en tierra (Othman, Jafri, & San, 2010), (Kaufman & Tanré, 1998), (Poortinga et al., 2017), (Ung et al., 2002). En particular las imágenes de los satélites Landsat 5 TM (Thematic Mapper), Landsat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) y Landsat 8 OLI/TIRS (Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor) se han utilizado para cartografiar concentraciones de PM_{10} ya que cuentan con buena resolución espacial y variedad de bandas espectrales (visibles, infrarrojas y térmicas) (Saleh & Hasan, 2014).

En consecuencia, en este trabajo investigación se plantea una metodología en la que se desarrollan modelos matemáticos para la estimación de PM_{10} en el Valle de Aburrá, teniendo en cuenta valores de reflectancia de las bandas espectrales de las imágenes satelitales LANDSAT 8 (Aerosol, Rojo, Verde, Azul e Infrarrojo Cercano) y los valores de PM_{10} observados en las diferentes estaciones

de monitoreo de calidad de aire. Luego, se selecciona el modelo con mejor ajuste, y se aplica una validación para corroborar la relación entre PM_{10} y la reflectancia de estas cinco bandas, esto con el fin de obtener datos de PM_{10} para cualquier zona del Valle de Aburra.

El documento se encuentra organizado por secciones, en la primera parte se establecen los conceptos preliminares que dan origen al trabajo, posterior a ellos se presenta un marco teórico acerca de la teledetección y sus aplicaciones para continuar con la descripción de la zona de estudio y la metodología que se llevó a cabo, finalmente se presentan los resultados, validación y conclusiones.

2. Planteamiento del problema

2.1. Definición del problema

En la actualidad cientos de millones de personas sufren de una enfermedad respiratoria crónica (ERC), según estimaciones recientes de la Organización Mundial de la Salud (OMS) cerca de 235 millones de personas que padecen asma y 64 millones sufren enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) (Organization World Health & Others, 2004), el nivel de riesgo más relevante para estas enfermedades es la contaminación atmosférica, la problemática con esta contaminación es bastante critica, para el año 2003 1,4% de las muertes en el mundo fueron asociadas a la mala calidad del aire (Cohen et al., 2004).

El monitoreo de calidad del aire se ha convertido en un tema trascendental para las autoridades ambientales en los diferentes países en el mundo, ya que su estudio ha evidenciado una relación directa con la salud humana y el cambio climático (Gaviria, Muñoz, & González, 2012), por lo tanto, en cuanto más información se tenga a cerca de las causas y efectos de este fenómeno se podrán tomar mejores decisiones para aumentar la calidad de vida de las personas. Este monitoreo en Colombia se realiza por medio del Protocolo Nacional de Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire, creado entre el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y las Autoridades Ambientales Colombianas, el cual basa su funcionamiento en un Sistema de Vigilancia de Calidad de Aire (SVCA) que está compuesto principalmente por un conjunto de

estaciones (fijas y móviles) que capturan la información del aire presente en la atmósfera (Ministerio de Ambiente, 2008)

En el año 2016 se declaró contingencia atmosférica por parte de las autoridades ambientales de la ciudad de Medellín en Antioquia, por un aumento considerable en las partículas contaminadas concentradas en el aire; estas partículas también llamadas Material Particulado (PM) están clasificadas según su tamaño, las partículas menores a 10 micrómetros son consideradas respirables, y dependiendo de sus compuestos, son altamente nocivas para la salud humana (Alias et al., 2007); en la última versión del Congreso Colombiano y Conferencia Internacional del Aire Calidad del Aire y Salud Pública (CASAP), se presentaron las diferentes metodologías que se están utilizando para la medición de partículas de contaminación en donde se reflejan solamente valores de contaminación promedio en el área de influencia de las estaciones de monitoreo, lo cual no permite establecer los niveles de contaminación para la ciudad completa, ni para el Valle de Aburra.

En las últimas décadas la humanidad se ha interesado por la vigilancia y análisis de la tierra desde el espacio por medio de los sensores remotos y las múltiples misiones espaciales, ya que permiten obtener las imágenes satelitales que en la actualidad brindan la posibilidad de realizar monitoreo de calidad del aire en centros urbanos, debido a que la medición *in-situ* proporcionada por las estaciones de monitoreo de calidad de aire presentan una fuerte limitación en términos de cobertura (Mejia Chavarriaga, 2016).

2.2. Pregunta de investigación e Hipótesis

2.2.1. Pregunta de investigación.

¿Es posible por medio de la teledetección e información de estaciones de calidad de aire en tierra, estimar cantidad de material particulado (PM_{10}) en la capa de la troposfera en el Valle de Aburra, Antioquia para el año 2016?

2.2.2. Hipótesis.

La metodología existente para estimar la cantidad de material particulado en la troposfera en Colombia, se realiza por medio de muestreo con la utilización de una serie de estaciones sobre la superficie de la tierra, esto implica que en las zonas donde no hay estaciones no se tiene información de calidad del aire, lo que generalmente se hace para obtener los valores de material particulado en estas zonas, obedece a un proceso de interpolación que no presenta la exactitud deseada y limita la posibilidad de establecer los lugares o entidades que emiten la mayor cantidad de contaminación.

Esta investigación propone por medio del análisis de imágenes satelitales LANDSAT adquiridas por el sensor en diferentes fechas del año 2016 plantear un modelo PM_{10} con el cual se encuentre el valor del material particulado en cualquier zona geográfica de la región, todo esto con base en las mediciones en tierra de PM_{10}. Para ello, se utilizaron las 5 primeras bandas de LANDSAT 8 OLI/TIRS y se buscaron las que más correlacionadas estaban con el valor del aerosol en una misma

localización (PM_{10} observado); por otro lado, se verificó y comprobó el modelo, comparando los resultados de PM_{10} estimados del modelo con mejor ajuste con sus respectivos valores PM_{10} observados por las estaciones de monitoreo de calidad de aire en tierra y que no fueron usados en la construcción del mismo, los que se denominó muestra de validación.

3. Justificación

La ciudad de Medellín para el 2015 contó con 2,499 millones de habitantes, según el informe presentado por la Alcaldía de Medellín (Documento técnico de soporte del Plan de Ordenamiento Territorial), la tasa de crecimiento media anual será de 1.067% entre el 2005 y el 2020 (Medellín comó vamos, 2016), en el 2016 esta ciudad tuvo que iniciar planes de contingencia ya que los niveles de material particulado en el aire llegaron a 127 microgramos por metro cubico, según un informe presentado por el Área Metropolitana del Valle de Aburra en asocio con el Clean Air Institute de la ciudad de Washington, en la ciudad crece anualmente un 35% el parque automotor, el cual genera el 80% de las partículas menores de contaminación (Gómez Comba, 2018); por todo esto es necesario que se generen nuevas metodologías para medir la cantidad de contaminación que se presenta en todas las zonas de la ciudad, ya que las metodologías de medición actuales trabajan con estaciones fijas que toman valores puntuales y el resto de los datos se obtienen por medio de interpolación, por lo que estos no son del todo verídicos ni suficientes y tampoco permiten encontrar con exactitud los focos de contaminación que se existen.

En la última década alrededor del mundo se han creado gran variedad de sensores remotos para la vigilancia del planeta en aspectos como la tierra, el agua y el aire, generando así imágenes de las que se puede obtener variedad de información que sirve para analizar el estado actual de diferentes elementos, y a diario se generan mejoras en estos enfocadas en tener datos más exactos, es el caso de la misión Sentinel–5 que se centra en el monitoreo de concentraciones de gases traza y aerosoles en la atmosfera con el objetivo de apoyar en tiempo real la supervisión de medidas de calidad del aire, monitoreo del ozono estratosférico, mediciones de radiación solar y monitoreo del clima,

obteniendo datos como: O_3, NO_2, SO_2, HCHO, CO, CH_4 y profundidad óptica de aerosol (Guanter et al., 2015).

Por medio de la siguiente investigación se pretende crear una metodología, que permita determinar la concentración de partículas contaminantes, con el objetivo de obtener datos comparables con los entregados por medio de las 6 estaciones de medición del aire con las que cuenta la zona de estudio, esta metodología proyecta el uso de nuevas tecnologías como lo es la teledetección, que puede complementar el monitoreo de calidad del aire convencional.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

- Establecer una metodología para la estimación de material particulado PM_{10} en la capa troposfera a partir del análisis de imágenes satelitales. área de estudio: Valle de Aburra, Antioquia, para el año 2016.

4.2. Objetivos Específicos

- Definir técnicas de teledetección que permitan la estimación de material particulado en la capa troposfera a partir de imágenes satelitales LANDSAT.

- Implementar una metodología de procesamiento digital de imágenes para la caracterización de material particulado en la capa troposfera.

- Evaluar la relación entre el PM_{10} obtenido mediante mediciones directas en estaciones de monitoreo de calidad de aire y los datos de reflectancia de las bandas multiespectrales de Landsat 8 a través de métodos estadísticos de regresión multivariante.

- Validar la metodología obtenida del cálculo de la concentración de material particulado mediante la comparación de las estimaciones conseguidas con imágenes satelitales y las mediciones de las estaciones de monitoreo de calidad del aire.

5. Marco teórico

En la primera sección 5.1. del capítulo 5. se abordan las generalidades de la teledetección, sus diferentes aplicaciones, Landsat y su última versión (Landsat 8) que se usaron en la investigación; en la sección 5.2. se expone el tema de la atmosfera, sus características y la descripción de la troposfera de forma más específica; la contaminación atmosférica, los aerosoles, su incidencia en las principales ciudades del mundo y el cambio climático; las normas de control se presentan en la sección 5.3., en la sección 5.4. se aborda el tema de contaminación en el Valle de Aburra; para la sección 5.5. se describe la medición de material particulado con métodos de teledetección.

5.1. Generalidades de la teledetección

Las Naciones Unidas han definido la Teledetección mediante la Resolución 41/65 de 1986, como: "la superficie terrestre desde el espacio mediante el uso de las propiedades de las ondas electromagnéticas emitidas, reflejadas o difractadas por los objetos detectados, para el propósito de mejorar el manejo de los recursos naturales, uso del terreno y protección del ambiente" (Chuvieco, 1990), un ejemplo de esta se visualiza en Figura 1 en la que se representa el satélite sentinel 2 adquiriendo información de una franja de la superficie terrestre.

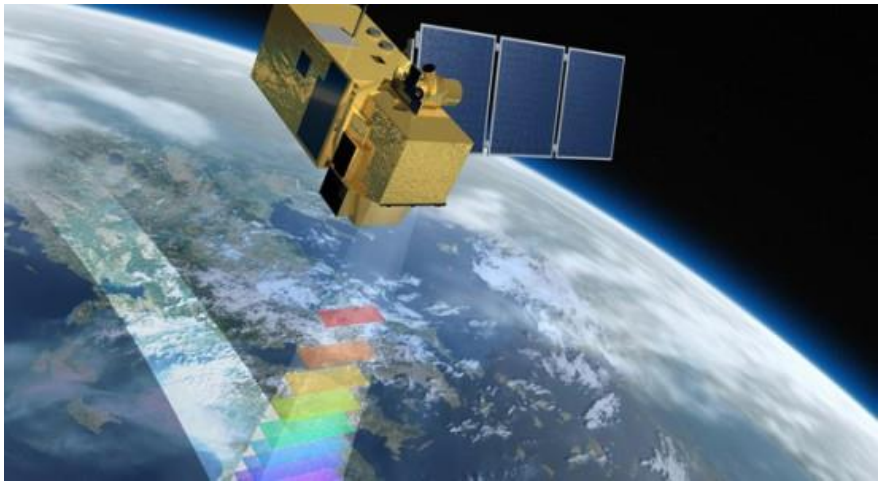


Figura 1. *Representación satélite Sentinel 2.*

Fuente: (La teledetección como aliada en la lucha contra la sequía, 2018)

La teledetección inició en el siglo XX, presentando dos etapas básicas, una aérea y una espacial, comenzando por las fotografías aéreas tomadas desde globos, posterior a esto se tomaron desde aviones y su uso fue militar (Primera Guerra Mundial), de aquí surgen los primeros desarrollos cartográficos, más tarde la fotografía aérea se dedicó a la prospección geológica y minera, a la realización de inventarios forestales y a la cartografía de zonas poco conocidas; para la segunda guerra mundial la necesidad del control de las zonas generó avances significativos en la tecnología de desarrollo de lentes, películas, nuevos sensores como el radar y mejora en la estabilidad de los aviones; los años siguientes a la guerra se dedicaron a las técnicas de fotogrametría para la cartografía, al pasar los años se formaron revistas especializadas, sociedades y organizaciones, todo alrededor de esta área, la cartografía estaba basada en la restitución y la fotointerpretación de pares estereoscópicos de fotos aéreas (Sobrino et al., 2001).

Los satélites portan sensores que miden la radiación electromagnética procediendo del sistema tierra-atmosfera, en 1959 se obtuvo la primera foto de la tierra a bordo de Explorer-6 la cual se presenta en la Figura 2.

Figura 2. *Primera imagen satelital por Explorer 6.*

Fuente: NASA, 2002.

Posterior a esto se colocaron en marcha varias misiones satelitales meteorológicas como TIROS 1, Mercury, Apolo, Eros y el 23 de julio de 1972 se materializo el primer satélite diseñado para el estudio de recursos naturales LANDSAT 1 lo cual abrió una nueva etapa en la historia de la teledetección (Sobrino et al., 2001).

Los sensores pasivos miden la energía radiante reflejada o emitida por el sistema Tierra-Atmosfera y los sensores activos emiten rayos de radiación sobre el sistema tierra-atmosfera y miden la radiación retro dispersada (C. P. Gutiérrez & Nieto, 2006), las mediciones satelitales contienen información sobre las condiciones de la superficie y la atmosfera por lo que las diferentes

coberturas de la tierra responden de forma diferente al sensor y esto da la posibilidad de estudiarlas y analizarlas (Chuvieco, 1990).

5.1.1. Aplicaciones de la teledetección

Las aplicaciones de la teledetección son múltiples y variadas, teniendo en cuenta que existen numerosas plataformas y sensores, ciencias como la geografía, biología, geología, agronomía y oceanografía demandan el tratamiento de imágenes satelitales ya que a observación terrestre proporciona información sobre el estado de la cubierta del planeta (Sobrino et al., 2001); Un ejemplo de esto es la agricultura, teniendo en cuenta que el 37% de la superficie terrestre se emplea para fines agrícolas por medio de teledetección se mide el rendimiento de los cultivos con imágenes SENTINEL y se capturan los rápidos cambios de la producción agrícola, esto gracias a la resolución de 10 metros y la política de datos abiertos de estas imágenes (Miralles, 1991); Otro ejemplo es la calidad del agua ya que se realiza monitoreo de la calidad de las masas continentales de agua en áreas de escasos recursos como África y se analizan los efectos de la contaminación en el ciclo del agua muy importantes para el seguimiento de sedimentos de actividades agrícolas o vertidos industriales (C. P. Gutiérrez & Nieto, 2006), también la teledetección se aplica en la vigilancia de la superficie terrestre, por ejemplo con el uso de bandas infrarrojas se pueden identificar nuevos yacimientos de recursos como el petróleo, o se pueden hacer análisis de expansión urbana, control de humedad del suelo, planificación y control poblacional y un sinfín de usos más (Outillas, Rojas, & Ferrando, 2004).

Una de las aplicaciones más representativas es la detección remota por satélite de la calidad del aire de materia particulada que permite la estimación de masa de PM_{10} en la superficie usando la profundidad óptica del aerosol derivada del satélite a longitud de onda visible (Rojas, Duque, & Hernández, 2017), esta aplicación da la posibilidad de saber la tendencia espacial de PM_{10} a nivel regional y nacional y evaluar la exposición de los mismos para estudios de efectos sobre la salud; la mayor dificultad de esta aplicación está en la resolución espacial y temporal de los sensores.

5.1.2. Landsat

El Programa Landsat es una serie de misiones satelitales de observación de la Tierra administradas conjuntamente por la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos, el 23 de julio de 1972 se lanzó el Satélite de Tecnología de Recursos de la Tierra (ERTS-1). Más tarde, pasó a llamarse Landsat 1. Los satélites Landsat adicionales siguieron en los años 70 y 80, y en 1999 se lanzó Landsat 7. Landsat 8 (inicialmente denominado *Landsat Data Continuity Mission* - LDCM) es el más reciente de la serie Landsat, lanzado el 11 de febrero de 2013. Actualmente está en desarrollo el Landsat 9, con un lanzamiento programado para fines de 2020; Los instrumentos a bordo de los satélites Landsat han adquirido millones de imágenes a lo largo de las misiones, y los datos son un recurso valioso para la investigación y aplicaciones del cambio global en agricultura, silvicultura, geología, planificación regional y educación (Markham, Storey, Williams, & Irons, 2004)

Los sensores Landsat orbitan alrededor de la Tierra en órbita circular heliosincrónica, a 705 km de altura, con una inclinación de 98.2º respecto del Ecuador y un período de 99 minutos. La órbita de los satélites está diseñada de tal modo que cada vez que éstos cruzan el Ecuador de Norte a Sur lo hacen entre las 10:00 y las 10:15 de la mañana hora local. Los Landsat están equipados con instrumentos específicos para la teledetección multiespectral (Chander, Markham, & Helder, 2009); en la Figura 3 se presentan las diferentes misiones de landsat y el tiempo en el que estuvieron activas.

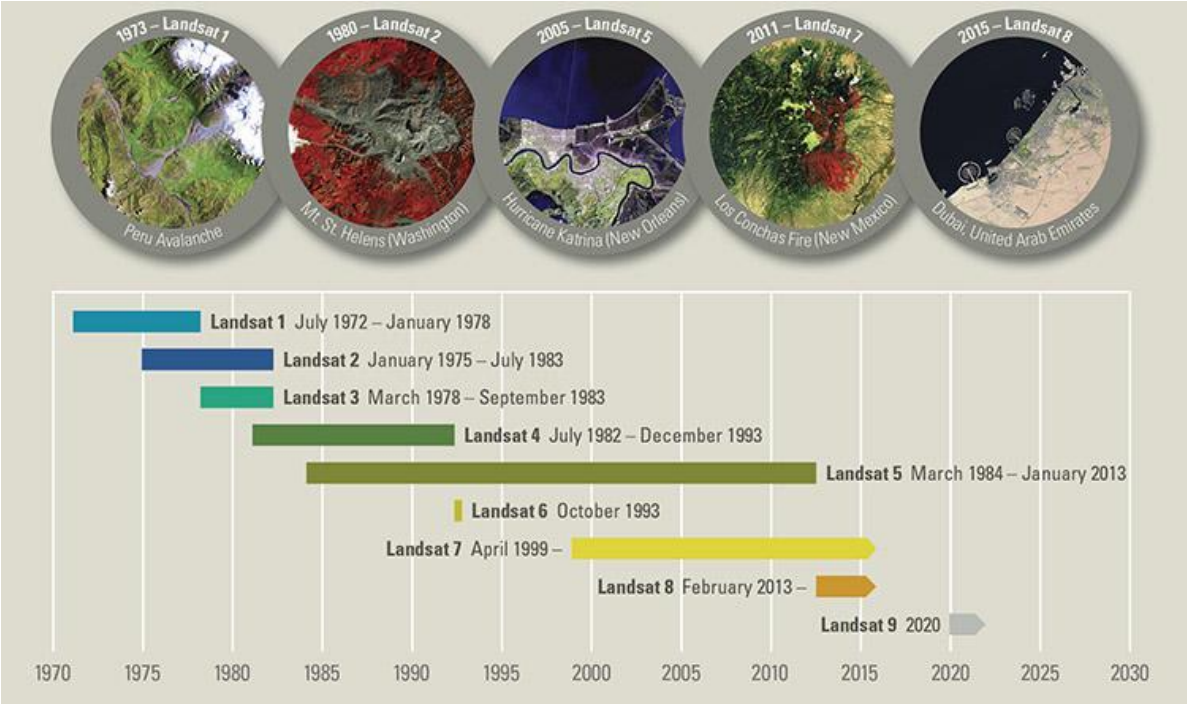


Figura 3. *Misiones Landsat*

Fuente: (Servicio Geologico de Estados Unidos , 2018)

5.1.3. Landsat 8 (Landsat Data Continuity Mission)

La octava versión de Landsat (LDCM) es un satélite de observación que continua el legado de archivo de los anteriores satélites, este programa amplió y mejoró el registro de imágenes multiespectrales, el sistema está compuesto por dos segmentos:

- El observatorio: Plataforma con capacidad de carga de dos sensores de observación, el primero llamado *Operational Land Imager* (OLI) y el segundo sensor *Thermal Infrared Sensor* (TIRS); estos dos sensores recogen datos de todo el planeta.
- El sistema terrestre: Proporciona la capacidad necesaria para la planificación de las operaciones de los dos sensores, para administrar y distribuir los datos.

  (Roy et al., 2014)

La plataforma LDCM tiene una vida útil de 5 años, pero lleva combustible para 10 años, orbita de norte a sur durante el día, en comparación con misiones anteriores, Landsat 8 tiene 2 bandas nuevas: un canal profundo en el azul visible (*Coastal/Aersol Band*) y un nuevo canal infrarrojo (*Cirrus Band*) (Ariza, 2013), en la Figura 4 se presentan las diferencias en el ancho de longitud de onda de las diferentes bandas de Landsat 7 y Landsat 8.

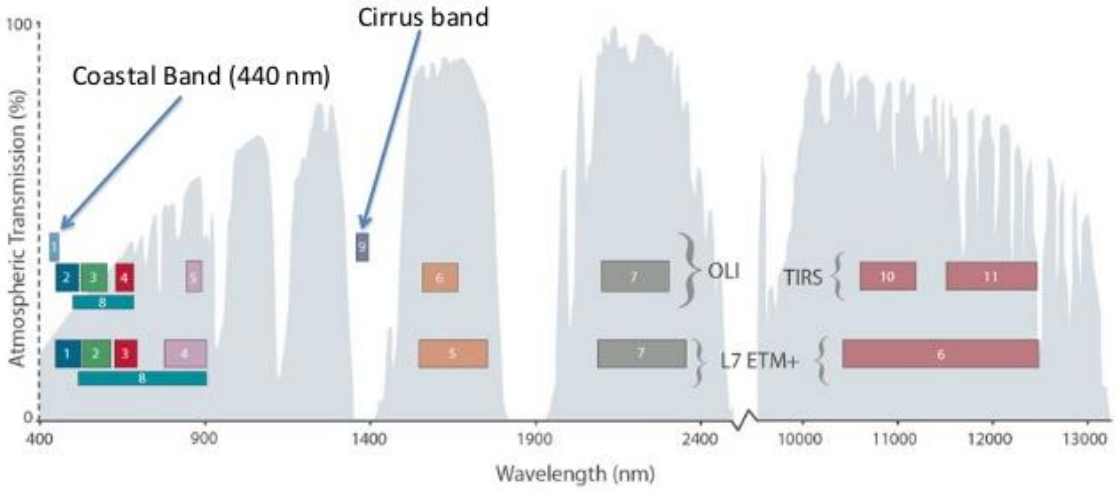


Figura 4. *Ancho de banda Landsat 7 y Landsat 8.*

Fuente: (Servicio Geologico de los Estados Unidos) 2013

Cuenta con una resolución radiométrica de 12 bits, se recogen aproximadamente 400 escenas al día, las cuales están disponibles para todo el mundo, son compatibles con los datos de los Landsat anteriores, maneja formato geoTIFF, proyección cartográfica *Universal Tranversal Mercator* (UTM), datum al sistema geodésico mundial (WGS 84), valores de pixel en 16 bits; las imágenes constan de 9 bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros excepto la banda 8 pancromática que tiene resolución espacial de 15 metros, también tiene 2 bandas térmicas; la 10 y la 11 con 100 metros de resolución especial, el tamaño aproximado de la escena es de 170 km por 183 km (Roy et al., 2014), en la Tabla 1 se presenta la longitud de onda y resolución de las diferentes bandas de Landsat 8 OLI/TIRS.

Tabla 1. *Bandas Landsat 8 OLI/TIRS*

Fuente: (Servicio Geologico de los Estados Unidos, 2013)

BANDAS	LONGITUD DE ONDA (micrómetros)	RESOLUCIÓN (metros)
Banda 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
Banda 5 - Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
Banda 8 - Pancromático	0.50 - 0.68	15
Banda 9 - Cirrus	1.36 -1.38	30
*Banda 10 - Infrarrojo Térmico (TIRS) 1	10.6 - 11.19	100
*Banda 11 - Infrarrojo Térmico (TIRS) 2	11.5 - 12.51	100

Landsat 8 tiene varios productos los cuales se diferencian por la nomenclatura que utilizan, tienen productos desde nivel 0 (L0) que no tienen ningún tipo de corrección, pasando por los niveles L1R, L1G, L1Gt hasta L1T. Los productos estándar L1T, son productos que se encuentran en formato de niveles digitales enteros (DN) con una resolución radiométrica de 16 bits. Estos se pueden convertir a valores de reflectancia en el techo de la Atmósfera (TOA) - (bandas 1-9) o radiancia (Bandas 1-11) con factores de escala previstas en los metadatos del producto (Ariza, 2013).

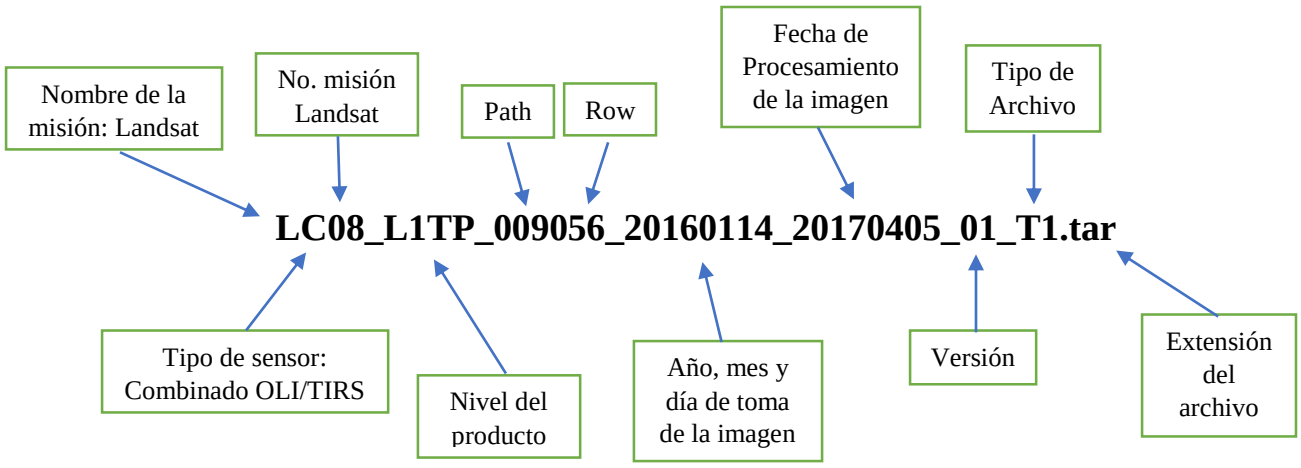


Figura 5. *Nomenclatura Landsat 8.*

La nomenclatura que utilizan los diferentes productos de Landsat 8 se describen en la Figura 5.

5.2. Atmósfera

La atmósfera es la capa gaseosa que rodea al planeta Tierra, se divide teóricamente en varias capas concéntricas sucesivas, estas son, desde la superficie hacia el espacio exterior: troposfera, tropopausa, estratosfera, estratopausa, mesosfera y termosfera (Hartmann et al., 2013).

Es una mezcla de varios gases y aerosoles (partículas sólidas y líquidas en suspensión), forma el sistema ambiental integrado con todos sus componentes. Entre sus variadas funciones mantiene condiciones aptas para la vida y protege a la tierra de colisiones con otros astros. Su composición es sorprendentemente homogénea, resultado de procesos de mezcla, el 50% de la masa está concentrado por debajo de los 5 km. s.n.m. Los gases más abundantes son el N_2 y O_2 (Barry, Chorley, & Guilló, 1972)

5.2.1. Características de la atmósfera

La mayoría de los planetas poseen atmósfera, la del planeta tierra está compuesta en un 78% de nitrógeno, un 20% de oxígeno, un 0.93% de argón, cerca de un 0.04% de dióxido de carbono, un porcentaje más pequeño que corresponde a neón, helio y metano, llamados gases traza, y una pequeña cantidad de vapor de agua, a todo esto, se le llama aire (Hartmann et al., 2013).

Respecto a las capas de la atmósfera desde el suelo hacia el cielo se encuentra la troposfera, la estratosfera que cubre desde los 10 km de altura hasta los 50 km, esta capa contiene pequeñas cantidades de ozono (capa de ozono) lo cual impide que los rayos UV lleguen a la tierra, seguida esta la mesosfera que cubre desde los 50 km de altura hasta los 85 km, es la zona más fría de la atmósfera, en ella se desintegran todos los objetos extraterrestres que se acercan a la tierra y se determinan la formación de turbulencias (Llinares, 2007); la capa que continua es la ionosfera que abarca desde los 85 km de altura hasta los 400 km, esta capa conduce la electricidad, absorbe las ondas de radio de alta frecuencia, refleja las partículas del viento solar (auroras boreales) y absorbe las radiaciones solares (rayos gamma y rayos x); finalmente la exosfera es el límite superior de la atmosfera, en esta capa el aire pierde sus cualidades físico-químicas, en ella se puede encontrar satélites meteorológicos de órbita polar y demás satélites artificiales (Barry et al., 1972).

5.2.2. La troposfera

La troposfera o baja atmósfera, es la que está en contacto con la superficie terrestre y se extiende hasta los 11 km. s.n.m. en promedio, tiene un grosor que varía desde 8 km en los polos, hasta 16 km en el ecuador, principalmente debido a la diferencia de presupuesto energético en esos lugares. Abarca el 75% de la masa de gases totales que componen la atmósfera, el 99% de la masa de la atmósfera se encuentra bajo los 30 km. s.n.m (Barry et al., 1972)

En la troposfera ocurren eventos como la lluvia, viento y nieve, además concentra la mayor parte de oxígeno el cual respiramos y vapor de agua, esta capa actúa como regulador térmico ya que en

ella disminuye la temperatura a medida que aumenta la altura y el aire se vuelve menos denso por lo que así se produce el clima; cualquier sustancia que las personas introducen a la atmosfera, que tenga efectos dañinos sobre los seres vivos o el medio ambiente, se considera contaminante del aire y por ende de la troposfera (Hartmann et al., 2013), en la Figura 6 se muestra una imagen de la troposfera.

Figura 6. *Troposfera.*
Fuente: Propia

5.3. Contaminación Atmosférica

La contaminación atmosférica es la presencia que existe en el aire de pequeñas partículas que pueden implicar daño, molestia o riesgo para los seres vivos que se encuentran expuestos a dicho ambiente (Caselli, 2000).

Desde el inicio de la revolución industrial, en la segunda mitad del siglo XVIII se dio comienzo a un sin fin de contaminantes atmosféricos por causas como: el uso de combustibles, la producción de fábricas y de gases nocivos para la salud; este proceso inicia a partir de las emisiones al aire de contaminantes desde los distintos focos emisores. Los contaminantes son emitidos a la atmósfera en una cantidad determinada, en un punto determinado y por una actividad determinada, a esto se le llama emisión (Lopez, Quiroz, Cardoso, & Espinosa, 2007).

La contaminación atmosférica parece acompañar al hombre y sus actividades, proviniendo la mayor parte de ella de la combustión, la cual es esencial para la vida humana, tal y como la conocemos, y para el nivel de desarrollo de la sociedad, ya que permite la obtención de energía mecánica, luz y calor. Una estimación que proviene de Estados Unidos sitúa en alrededor de 133 millones de toneladas la cantidad de contaminantes de todos los orígenes (exceptuando el dióxido de carbono) emitidos en un año sobre el territorio federal mexicano, alrededor de dos tercios (es decir 90 millones de toneladas) proceden de todos los medios de transporte, que se basan en procesos de combustión (Llinares, 2007).

Existen 2 principales fuentes de emisión, las fuentes fijas como las industrias, canteras y minería localizadas en un punto determinado, y las móviles como los vehículos o aviones, La capacidad de la atmósfera de dispersar las concentraciones de los contaminantes viene determinada por las condiciones meteorológicas, siendo los parámetros meteorológicos que más directamente se relacionan con la contaminación atmosférica y su dispersión la velocidad del viento, la dirección

del viento y la variación de la temperatura con la altura, entre otros (Romero Placeres, Diego Olite, & Álvarez Toste, 2006)

Dentro de los gases contaminantes más trascendentales en la atmosfera se encuentran:

- Dióxido de Carbono
- Metano
- Óxido Nitroso
- Ozono
- Halo-carbonos
- Aerosoles

El deterioro continuo de la calidad del aire condujo a la celebración de diferentes convenciones internacionales, en sus inicios la respuesta de los gobiernos, la industria, los investigadores y los organismos internacionales fue lenta y pesimista respecto a la posibilidad de dar solución a los inconvenientes, en 1972 se celebró la Primera Conferencia sobre el Ambiente Humano de la Organización de Naciones Unidas, en Estocolmo, donde –en conjunto con los movimientos públicos– se persuadió a muchos gobiernos a desarrollar la legislación necesaria para limitar las emisiones de contaminantes químicos tóxicos al ambiente, así como la introducción de nuevas tecnologías y políticas con este fin (Jankilevich, 2012). Como resultado de dichas acciones, en algunos países desarrollados se redujeron los problemas de la contaminación industrial.

La contaminación atmosférica tiene un gran impacto negativo en la salud humana. Los residuos tóxicos en el aire hacen más susceptibles a la muerte a personas de avanzada edad, deteriora la

salud del hombre, causa enfermedades cardiovasculares, conjuntivitis, cáncer de pulmón, cáncer en la piel, enfermedades en la sangre y problemas de visión. Además de esto disminuye las capacidades del sistema inmunológico haciendo a las personas susceptibles a diversas enfermedades (Lopez, Quiroz, Cardoso, & Espinosa, 2007).

5.3.1. Aerosoles

Los aerosoles atmosféricos son partículas sólidas o líquidas suspendidas en la atmósfera cuyos tamaños pueden oscilar entre 0.001 – 100 µm. La mayor parte de los mismos en la atmósfera poseen un origen natural; los ejemplos más notorios pueden ser las partículas de sal del rocío marino o el polvo de los desiertos, que con frecuencia es transportado a enormes distancias forestales (Díaz Rodríguez, 2006).

Los aerosoles incluyen polvo, cenizas, cristales de sal oceánica, esporas, bacterias, entre otros. Sus efectos sobre la turbidez atmosférica pueden variar en cortos periodos de tiempo, por ejemplo, luego de una erupción volcánica. En el largo plazo, los efectos son bastante equilibrados debido al efecto natural de limpieza atmosférica, aunque el proceso nunca es completo. Las fuentes naturales se calculan que son 4 a 5 veces mayores que las antropogénicas. Tienen el potencial de influenciar fuertemente la cantidad de radiación de onda corta que llega a la superficie terrestre (Romero Placeres et al., 2006).

Las partículas PM_{10} pueden ser inhaladas y penetrar con facilidad al sistema respiratorio humano causando efectos adversos en la salud de las personas. La cantidad de material particulado inhalado

depende de la respiración (frecuencia y profundidad) de cada persona y del tamaño de la partícula (Pope III & Dockery, 2006). El PM_{10} está compuesto por materiales cristalinos como sílice, compuestos de hierro y aluminio; la masa de partículas ultrafinas está compuesta por material orgánico y también por contaminantes inorgánicos como sulfatos, amonio y otros (Cohen et al., 2004).

5.3.2. Contaminación del aire a nivel mundial

La mayoría de la población mundial está expuesta a niveles de contaminación atmosférica altos; ciudades como Los Ángeles, Denver, Ciudad de México y Santiago de Chile están ubicadas en cuencas rodeadas por montañas, experimentando altos niveles de contaminación del aire influenciados por la topografía del área circundante. Las causas de sus problemas de contaminación son complejas, estas situaciones demuestran cómo los factores naturales favorecen la mayor concentración de contaminantes (Enkerlin Hoeflich, Cano, Garza Cuevas, & Vogel Martinez, 1997)

Los países más contaminantes parecen concienciados en reducir sus emisiones, pero, a pesar de acuerdos como el Protocolo de Kioto, las emisiones de dióxido de carbono siguen aumentando. Los países que más contaminan son China, Estados Unidos, India, Rusia y Japón (Organization World Health & Others, 2016). Todo esto ha producido el cambio climático que afecta a todo el planeta Tierra.

5.3.3. Cambio Climático

De acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC), el cambio climático es la alteración de la composición de la atmosfera mundial (condiciones predominantes) y se suma a los cambios naturales del clima observados durante ciertos periodos de tiempo, estos cambios se producen por la variación de la radiación solar, variaciones de los parámetros orbitales de la tierra, los movimientos de la corteza terrestre, la contaminación atmosférica, entre otros (Vicente, 2014).

En Colombia se ha registrado un incremento de 0.2 a 0.3 grados centígrados por década y una disminución en las lluvias mensual de entre 2 y 3 mm por década, teniendo en cuenta esto para el periodo del 2070 al 2090 la temperatura aumentará de 1 a 4 grados centígrados y la precipitación variará entre el 15-30 % (Pabón, 2003).

Cambios en las corrientes oceánicas, incrementos en el nivel del mar, tormentas más poderosas y de mayor duración, sequías, incendios y desaparición de ecosistemas son las principales consecuencias del cambio climático, todas relacionadas entre sí ya que las condiciones en el planeta Tierra están relacionadas y un cambio en los océanos, por ejemplo, tendrá un efecto en los vientos y este a su vez tendrá su efecto en las cosechas (Vicente, 2014).

5.3.4. Normas de control

La atmósfera es un sistema dinámico que se encuentra en constante movimiento; las sustancias que la componen se transforman continuamente por efecto de reacciones químicas; además, hay un intercambio continuo de material entre la atmósfera, los océanos y el suelo. En cierto sentido, la contaminación es precisamente la modificación de este estado de equilibrio dinámico (Caselli, 2000).

Según la Ley 38/1972, de 22 de diciembre, de Protección del Ambiente Atmosférico se entiende por contaminación atmosférica, a la presencia en el aire de materias o formas de energía que impliquen riesgo, daño o molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza. Desde entonces y hasta hoy en día se han ido creando normas y leyes que permitan controlar, vigilar y mitigar la contaminación atmosférica; existen numerosos métodos para conseguir limitar las emisiones, algunos de estos prevén el uso de soluciones técnicas aplicadas antes, durante y después de los procesos de combustión (Bedoya & Martínez, 2009).

El Decreto 298 de 2016 establece la organización y funcionamiento del Sistema Nacional de Cambio Climático – SISCLIMA – es decir, el conjunto de entidades estatales, privadas y sin ánimo lucro, de políticas, normas, procesos, recursos, planes, estrategias, instrumentos, mecanismos, así como la información respecto al cambio climático, que se aplica de manera organizada para gestionar la mitigación de gases efecto invernadero y la adaptación al cambio climático en el país (Knowles & others, 2016).

La resolución 2254 del 1 de noviembre del 2017 establece la norma de calidad de aire o nivel de inmisión y adopta disposiciones para la gestión del aire en el territorio nacional, para garantizar un ambiente sano y minimizar el riesgo sobre la salud humana que pueda ser causado por la exposición a los contaminantes atmosféricos, en la Tabla 2 se presentan los niveles máximos permisibles de contaminación de diferentes contaminantes. En esta resolución también se plantean las normas que regirán en el 2030 las cuales serán de un nivel máximo permisible menor al actual, muestra los niveles permisibles de contaminantes tóxicos, presenta los sistemas de vigilancia con los que deben contar las diferentes zonas y regiones del país los cuales deben tener programas de reducción de contaminación del aire, también plantea los rangos de concentración para la declaratoria de los niveles de prevención, alerta o emergencia y los índices de calidad del aire (ICA).

Tabla 2. *Niveles máximos permisibles de contaminantes de aire.*

Fuente: (Resolucion 2254 Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible, 2017)

Contaminante	**Nivel Máximo Permisible (µg/m^3)**	**Tiempo de Exposición**
PM_{10}	50	Anual
	100	24 Horas
$PM_{2.5}$	25	Anual
	50	24 Horas
SO2	50	24 Horas
	100	1 Hora
NO2	60	Anual
	200	1 Hora
O3	100	8 Horas
CO	5000	8 Horas
	35000	1 Hora

5.4. Contaminación del aire en el valle de Aburra

La situación ambiental del Valle de Aburrá está encuadrada en una zona de gran explosión demográfica, con un asentamiento topográfico perjudicial para la dispersión de contaminantes un valle estrecho; cuenta además con un gran número de industrias consideradas como fuentes importantes de contaminación y que se encuentran ubicados a lado y lado del corredor del río Medellín y hacia el sur del valle (Bedoya & Martínez, 2009). En la parte central de éste se presenta la condición meteorológica de inversión de temperaturas en la que el aire relativamente caliente se superpone a una capa fría, la cual origina una turbulencia mínima y pronunciada inversión térmica y estabilidad en las horas de la mañana. Este fenómeno puede afectar áreas bastante extensas y cuando persiste durante varias horas o incluso días tiende a elevar las concentraciones de contaminantes (Lopez et al., 2007), en la Figura 7 se presenta el efecto de la polución en la ciudad de Medellín.

Figura 7*. Contaminación atmosférica Medellín., Colombia*

Fuente: Javier Nieto Álvarez, 2016

Para el Valle de Aburra con el fin de realizar un seguimiento a los principales contaminantes que afectan el aire de la región, se establecieron unos procedimientos por los cuales se recolecta la información para determinar la cantidad y peligrosidad de dicha contaminación, basados en los protocolos de monitoreo estipulados por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales), cumpliendo las normas o estándares internacionales, estos procedimientos determinan la concentración de TSP, PM_{10}, SO_2, O_3 y CO por medio de métodos como el alto volumen, el tetracloruro mercurato, la fotometría ultra violeta visible, espectrometría infrarroja no dispersiva (Mejia Chavarriaga, 2016), también en la ciudad de Medellín y su área metropolitana se mide el Índice de Calidad del Aire (ICA) que es la interpretación de los niveles de las concentraciones registradas en la región metropolitana, teniendo en cuenta los tiempos de exposición, es un valor adimensional, que lleva una escala numérica entre 0 y 500 (para el Valle de Aburrá el ICA va hasta 300), con rangos intermedios y representados por diferentes colores, las concentraciones registradas por la Red de monitoreo, la principal función del ICA es mantener informada a la población sobre la calidad del aire en escalas que sean comprensibles, todo esto teniendo en cuenta que el ICA en Colombia ha sido adoptado de la EPA Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, y el cual en nuestro país mide los siguientes contaminantes:

- Monóxido de carbono
- Dióxido de azufre
- Dióxido de Nitrógeno
- Partículas menores a 10 micrómetros
- Partículas menores a 2.5 micrómetros

(Gómez Comba, 2018)

Esta red de monitoreo es manejada por el Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), un proyecto de Ciencia y Tecnología del Área Metropolitana del Valle de Aburrá y la Alcaldía de Medellín, que cuenta con el apoyo y los aportes de EPM e ISAGEN. El SIATA es una estrategia regional para la gestión de riesgos, el cual monitorea las condiciones ambientales del territorio para fortalecer la toma de decisiones basada en información y la intervención oportuna de los organismos de respuesta posibilitando el acceso en tiempo real a la información generada y requerida sobre la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos que amenacen la calidad de vida de los habitantes metropolitanos (Mejia Chavarriaga, 2016)

El plan operacional para enfrentar episodios críticos de contaminación atmosférica (POECA) comprende un conjunto de medidas tendientes a reducir los niveles de contaminación en el corto plazo, con el objetivo de prevenir la exposición de la población a altos índices de contaminación atmosférica. El mecanismo de implementación es el Protocolo, el cual establece los roles y actividades de los actores involucrados en su ejecución (Hurtado Díaz & Avendaño Cantor, 2017).

5.5. Medición de material particulado con métodos de teledetección

Los datos e imágenes satelitales han resultado de gran utilidad para el análisis y caracterización de las situaciones que se presentan a diario en el planeta, un ejemplo de esto es una investigación que realizaron en la Universidad del Valle los autores Jonnathan Céspedes Rojas - Ingeniero Topográfico, Jaime Andrés Cuero Duque - Aspirante a grado Ingeniero Topográfico, Francisco Luis Hernández Torres - Esp. Topógrafo quienes presentaron un método para el uso de sensores

remotos con datos MOD02 de los sensores MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), procesados mediante Scripts Python, en el cual se relacionó la emisión de partículas con las imágenes de reflectancia, al aplicar modelos matemáticos a las imágenes satelitales se obtuvo información correspondiente al material particulado disperso en la zona de interés, con lo que se determinan las variaciones espaciales de las zonas con mayor presencia de emisión de partículas PM_{10} micrómetros (μm) en zonas del cultivo de caña de azúcar. Las imágenes obtenidas se utilizan para generar series de tiempo de la concentración de PM_{10}, que son comparadas con los datos generados en las estaciones de la red de calidad de aire, y con la concentración de material particulado calculada con la aplicación de modelos gaussianos para modelar la dispersión de partículas originadas en fuentes fijas. Los resultados obtenidos validan el uso de sensores remotos como un método versátil y efectivo, complementario al monitoreo de la calidad del aire convencional, respecto al área de estudio se determinó que la quema de caña no afecta directamente la disminución de la calidad del aire como se creía (Rojas et al., 2017).

Por medio de la teledetección se han creado metodologías para medir la concentración de diferentes tipos de aerosoles, ya que existen misiones satelitales creadas con el fin de vigilar el planeta tierra (satélites meteorológicos) y las tres capas más generales que lo componen: Agua, suelo y aire, es el caso por ejemplo del satélite METEOSAT su función más importante es la de suministrar datos en tiempo real a los modelos numéricos de predicción meteorológica. La información comprende temperatura, altitud, velocidad y dirección del viento, textura, temperatura y altitud de las nubes (diferenciando si están sobre vegetación, tierra, agua o nieve), nivel y altitud del vapor de agua, concentración de ozono y temperatura a nivel de suelo. Esta información se

obtiene por una serie de imágenes en diferentes bandas, desde el ultravioleta cercano hasta el infrarrojo (Schmetz et al., 2002), otro ejemplo sería la misión Sentinel-5 / UVNS que se centra en el monitoreo de las concentraciones de gases traza y aerosoles en la atmósfera para apoyar los servicios operativos que cubren aplicaciones de tiempo cercano en tiempo real, monitoreo del protocolo de calidad del aire y monitoreo del protocolo climático (Guanter et al., 2015), otro caso es MODIS un instrumento clave a bordo de los satélites Terra y Aqua de la NASA. La órbita de Terra alrededor de la Tierra se cronometra de modo que pase de norte a sur a través del ecuador por la mañana, mientras que Aqua pasa de sur a norte sobre el ecuador en la tarde. Terra MODIS y Aqua MODIS están observando la superficie de la Tierra cada 1 a 2 días, adquiriendo datos en 36 bandas espectrales o grupos de longitudes de onda. Estos datos mejorarán nuestra comprensión de las dinámicas y procesos globales que ocurren en la tierra, en los océanos y en la atmósfera inferior (Justice et al., 1998).

6. Estado del arte

Los datos satelitales de contaminantes atmosféricos son cada vez más utilizados en la evaluación de la calidad del aire, en el desarrollo de actividades de gestión ambiental en organizaciones públicas, privadas y organizaciones sin fines de lucro, los cuales son empleados para estimar las emisiones, rastrear las plumas contaminantes, respaldar las actividades de predicción de la calidad del aire, proporcionar pruebas de las declaraciones de "acontecimientos excepcionales", supervisar las tendencias regionales a largo plazo y evaluar el modelo de calidad del aire (Duncan et al., 2014). La aplicación de la teledetección para evaluar la calidad del aire en las ciudades ha sido abordada mediante diferentes instrumentos satelitales de monitoreo, donde el empleo de sensores como MODIS o TM/ETM+/OLI/TIRS a bordo de la serie LANDSAT, han permitido el hallazgo de material particulado (aerosoles atmosféricos) en tamaños perjudiciales para la salud humana.

En ese sentido, la metodología empleada por los diversos estudios científicos ha sido tenida en cuenta para la presente investigación, donde a continuación se mencionarán algunos trabajos nacionales e internacionales de vital relevancia, los cuales valiéndose del grado de procesamiento de los sensores han llegado a definir el espesor óptico, la geolocalización, los perfiles atmosféricos, entre otras características de mayor complejidad.

6.1. Teledetección a nivel internacional

Es preciso resaltar la tesis sostenida por A. Chudnovsky, A. Lyapustin , Y. Wang , C. Tang, J. Schwartz , P. Koutrakis (2013) (Chudnovsky et al., 2013), quienes utilizando el algoritmo de Implementación de Ángulo Múltiple de Corrección Atmosférica (MAIAC) obtuvieron resultados comparables a los obtenidos por el MOD04, en una relación de 0,50 a 0,45. Los científicos buscaban partículas de $PM_{2.5}$ y partieron del hecho de que la profundidad óptica (AOD) obtenida en las imágenes de MODIS no permite establecer la variabilidad espacial de los aerosoles en zonas urbanas; Por dicha razón, aplicaron el modelo mixto de MAIAC y MODIS a una ciudad de gran envergadura como lo es Boston, capital de Massachusetts en Estados Unidos, logrando demostrar que sus estudios tenían estrecha relación con las observaciones reales de estaciones en tierra -en un R^2 máximo 0.86- índice considerablemente bueno para un área urbana de esas características. Los investigadores incluyen la temperatura como factor que mejora las correlaciones, aunque a su vez descartan la humedad y la altura como variables dependientes para las mediciones y predicciones de la presencia del material particulado en la zona.

Por otra parte, es preciso citar el trabajo denominado Estimating Air Particulate Matter 10 Using Landsat Multi-Temporal Data and Analyzing its Annual Temporal Pattern over Gaza Strip, Palestine (Shaheen, Kidwai, Ain, Aldabash, & Zeeshan, 2017), investigadores que concentran su labor en el área de Palestina y la Franja de Gaza, espacio geográfico de especial conflicto político y social desde hace décadas, el cual denota una alta contaminación atmosférica y concentración de aerosoles. En este caso, se parte del PM_{10} como objeto de observación y las imágenes LANDSAT como herramienta de teledetección, empleando además un algoritmo multiespectral.

Los resultados arrojados por este estudio comprenden imágenes tomadas desde 2002 hasta 2014, donde desarrollan un algoritmo que estima las partículas del tamaño mencionado con base en las imágenes producidas por LANDSAT y los datos de estaciones ubicadas en tierra, hecho que parte de la tesis de los científicos pakistaníes de que la reflectancia atmosférica del sensor se refiere solo a la relación de la radiación con los contaminantes atmosféricos, es decir la radiación solar no toca el suelo. En todo caso, el análisis de esta zona del continente asiático permite ver una coincidencia entre el aumento de las partículas contaminantes y los procesos de urbanización y concentración de asentamientos humanos.

Otra investigación del año 2016 por resaltar es la denominada Tracking far-range air pollution induced by the 2014–15 Bárdarbunga fissure eruption (Iceland) de los autores Marie Boichu, Isabelle Chiapello, Colette Brogniez, Jean-Christophe Péré, Francois Thieuleux, Benjamin Torres, Luc Blarel, Augustin Mortier, Thierry Podvin, Philippe Goloub, Nathalie Söhne, Lieven Clarisse, Sophie Bauduin, François Hendrick, Nicolas Theys, Michel Van Roozendael, y Didier Tanré (Boichu et al., 2015) en el que presentan un estudio realizado respecto a la erupción de inundación de lava Holuhraun 2014-2015 de Bárdarbunga volcán (Islandia) que ha emitido cantidades prodigiosas de Dióxido de azufre en la atmósfera. Esta erupción causó un episodio a gran escala de contaminación del aire en toda Europa occidental en septiembre de 2014, el primer evento de esta magnitud registrado en la era moderna. En el estudio se reunió una gran cantidad de observaciones de sensores de satélite (OMI, IASI), imágenes terrestres (lidar y sunfotometría), redes de monitoreo de la calidad del aire a nivel del suelo para caracterizar tanto las distribuciones espaciales-temporales de SO_2 volcánico y aerosoles de sulfato, así como la dinámica de la capa límite planetaria. Por medio de estas imágenes se verifico la reflectancia de las partículas y la altura

de estas, fue necesario aplicar una serie de filtros en especial para evitar la alteración de la información debido a las nubes.

En el estudio se reproduce a escala continental la dispersión de la nube de Bárdarbunga SO2 desde Islandia hacia Francia. La mejora de los pronósticos de contaminación volcánica a gran escala del aire requerirá parámetros de emisión Adaptado para describir con precisión tanto el transporte de largo alcance como la dinámica de la capa límite local.

El documento denominado “Air quality modelling, simulation, and computational methods: a review” de Published by NRC Research Press (El-Harbawi, 2013) tiene como objetivo proporcionar una revisión teórica respecto a la historia, enfoques, desarrollos recientes, investigaciones importantes, métodos computacionales asociados y aplicaciones de modelos de la calidad del aire. Se abarca una amplia gama de temas, centrándose en las fuentes de contaminación atmosférica, contaminantes primarios y secundarios, química atmosférica, modelos de transporte químico atmosférico, programas informáticos para modelización de la dispersión, modelos de calidad del aire fuera de línea, asimilación de datos, computación paralela, aplicaciones del sistema de información geográfica en el aire, el índice de calidad del aire, así como el uso de datos de satélite y de teledetección en el modelado de la calidad del aire. Cada uno de estos elementos es ampliamente discutido, cubierto, y revisado con respecto a la literatura y los métodos diversos relacionados al modelado y aplicaciones de la calidad del aire.

El documento resulta muy útil ya que en él se exponen herramientas de evaluación, técnicas y métodos computacionales de simulación respecto a la calidad del aire, se presentan tablas donde

se evidencia la calidad del aire en diferentes lugares del mundo y varios de los modelos de la calidad del aire que existen; en el artículo se realiza un revisión de la historia de la contaminación, de lo que es, de los diferentes materiales o fuentes de contaminación y de cómo estos han ido aumentando en el tiempo, después expone como surge la idea de la aplicación de modelos para solucionar esta dificultad que comenzó a principios del siglo anterior.

Finalmente, la investigación realizada en Octubre del 2015 denominada Calidad del aire en la Ciudad Universitaria José Antonio Echeverría por partículas e inmisiones de NO2 y SO2 de los autores Liliette Barcelona Cazanave; Rosemary López Lee; Miriam Martínez Varona; Saturnino F. Pire Rivas; Anel Hernández Garcés; Luis F. Cuesta Cedeño y Grizel Pérez (Cazanave et al., 2015) muestra un estudio de la calidad del aire en la Cujae, empleando técnicas de monitoreo atmosférico como son, el muestreo pasivo de NO_2 y SO_2 con captadores tipo Radiello cuyo principio de funcionamiento está basado en la primera Ley de Fick. Las concentraciones promedio obtenidas para ambos gases fueron de 7,65 $\mu g/m^3$ y 1,53 $\mu g/m^3$ respectivamente. El muestreo activo de material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$) se realizó con muestreadores de bajo volumen de aire y filtro de cuarzo (ECHO-PM), los mayores valores de concentración medidos fueron de 85 $\mu g/m^3$ y 61 $\mu g/m^3$ respectivamente.

Utilizando factores de emisión se obtuvo los modelos de dispersión DISPER5.2 de material particulado. Se compararon los resultados de concentración obtenidos con los valores de concentraciones máximas admisibles establecidos en la norma cubana de calidad del aire NC 1020:2014, encontrándose que los gases no sobrepasaban las mismas, no siendo así para el material particulado. En este estudio lo primero que se hizo fue identificar y clasificar las fuentes de

contaminación, después se realizó el cálculo de emisión de los contaminantes, luego se determinó las emisiones del vertedero de residuos solido urbanos junto con las emisiones del área de estudio específica, se hizo un muestreo donde se identificó la composición química de estas, obteniendo finalmente tablas con gráficos y resultados del análisis de los valores de concentración de diferentes partículas, y finalmente se obtuvo que el muestreo realizado arrojó un valor promedio de concentración para 24 horas de 21,19 $\mu g/m^3$ donde se identificaron 19 elementos químicos en las muestras analizadas.

6.2. Teledetección a nivel nacional

La teledetección también ha tenido significativos aportes en el ámbito colombiano, donde por ejemplo el trabajo de Jonathan Céspedes, Jaime Cuero y Francisco Hernández (Rojas et al., 2017), permite conocer los efectos del cultivo de caña (y quema de caña de azúcar) en la zona sur del Rio Cauca, un espacio aproximado de 21 municipios del departamento del Valle del Cauca; en la contaminación de la troposfera de la zona. Para este abordaje se realizó el monitoreo del área mediante imágenes de MODIS MOD02 con las bandas de las regiones del visible 1 (Rojo), 3 (Azul) y 4 (Verde), ya que los investigadores consideraron la resolución espectral como eje para el estudio atmosférico, asumiendo la relación directamente proporcional entre AOT y PM_{10}. Los científicos colombianos tomaron las imágenes según las condiciones de nubosidad y las coordenadas geográficas de siembra, cosecha o quema de caña de azúcar, datos facilitados por la Corporación Autónoma regional de ese departamento. La investigación se desarrolló con datos recolectados entre 2011 y 2012, usando además modelos de dispersión Gaussianos para los datos meteorológicos, la georreferenciación de quemas y la modelación de emisiones.

Como resultados de la aplicación de la metodología y la validación con las estaciones en tierra se llegó a determinar que el MOD04 es una herramienta confiable en comparación con la red de estaciones en tierra, las cuales durante los dos años de estudio presentaron fallas y carencia de información. El estudio permitió además verificar las infracciones a normas ambientales establecidas, como por ejemplo el límite diario de emisiones fue excedido (Rojas et al., 2017).

En segundo lugar, el trabajo llamado Uso de Modelos Lineales Generalizados (MLG) para la interpolación espacial de PM10 utilizando imágenes satelitales Landsat para la ciudad de Bogotá, Colombia de Ramírez Gutiérrez (2017), permite ver la contaminación del aire de una ciudad colombiana tan importante como Bogotá, utilizando imágenes de LANDSAT 5 y 8 con las bandas del espectro visible, verificando los resultados con las estaciones en tierra de la Secretaria Distrital de Medio Ambiente y empleando el tamaño PM_{10} como medida. Para este trabajo se destaca la aplicación de modelo lineal generalizado – Modelo GAMMA, debido a que las partículas se encontraban entre 0 y la línea media. Aquí los valores son obtenidos de la reflectancia de cada estación y de la imagen. Es interesante la comparabilidad de los datos por localidades que arroja el estudio, donde para los años 2010, 2014 y 2015, se puede evaluar la concentración de contaminantes en las áreas comprendidas por las 15 estaciones de la red bogotana, concluyendo que las zonas industriales poseen una alta concentración de PM_{10}, mientras que las zonas rurales o de expansión una baja concentración. Para el área de la capital colombiana se destaca la dificultad para la toma de imágenes, puesto que la nubosidad impide un muestreo y algunas estaciones no reportan con regularidad los datos (M. A. R. Gutiérrez, 2017).

7. Área de estudio y datos

7.1. Área de estudio

El Área metropolitana del Valle de Aburrá está localizada en el departamento de Antioquia, Colombia, cuenta con una longitud aproximada de 60 kilómetros y un ancho de 30 a 90 kilómetros; en la Figura 8 se pueden visualizar los 10 municipios que la componen: Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Medellín, Envigado, Itagüí, Sabaneta, La Estrella y Caldas, en color gris se aprecian los centros poblados de los diferentes municipios, el Valle de Aburrá es la segunda área metropolitana más grande de Colombia (Horbath, 2016).

Figura 8. *Área de estudio Valle de Aburra, Antioquia*

Fuente: Metropol.gov.co

7.2. Datos (Imágenes)

La primera parte de esta investigación consistió en realizar un barrido de las diferentes imágenes existentes en el periodo a evaluar (año 2016), se definió usar imágenes satelitales LANDSAT 8 OLI/TIRS por su resolución espacial de 30 metros y por la variedad de bandas que posee (se presentan en la Tabla 1); la condición que debían cumplir las imágenes era que presentaran menos de un 60% de nubosidad en la zona de influencia (Valle de Aburra), este barrido se realizó por medio del visor de USGS (Servicio Geológico de los Estados Unidos) para el año 2016, en la Tabla 3 se presentan las fechas de adquisición y la identificación de cada escena utilizada y en la Tabla 4 se muestra el porcentaje de cobertura de nubes y las imágenes obtenidas gratuitamente de las colecciones del U.S. Geological Survey's (USGS). En total se descargaron y pre-procesaron para esta investigación 5 imágenes.

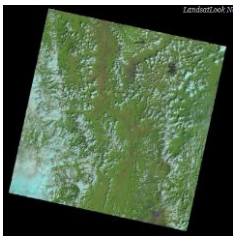
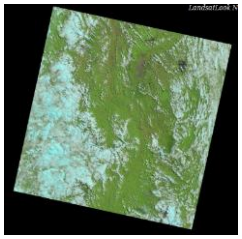
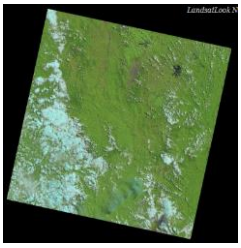
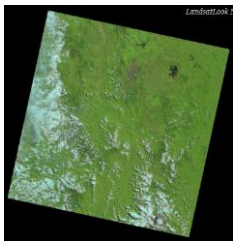
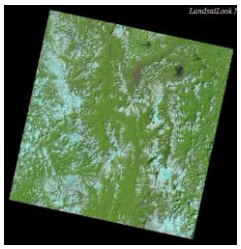
Tabla 3*.listado de imágenes usadas*

Fuente: Elaboración propia.

FECHA DE ADQUISICIÓN	IDENTIFICACIÓN DE LA ESCENA
14/01/2016	LC08_L1TP_009056_20160114_20170405
05/05/2016	LC08_L1TP_009056_20160505_20170325
21/05/2016	LC08_L1TP_009056_20160521_20170324
22/06/2016	LC08_L1TP_009056_20160622_20170323
28/10/2016	LC08_L1TP_009056_20161028_20170319

Tabla 4. *Imágenes Landsat 8 Path/Row adquiridas año 2016 usadas en investigación*

Fuente: Elaboración propia.

Satélite-Sensor- Nivel de Procesamiento	Identificación de la escena	Cobert. De Nubes (%)	Fecha de Adquisición	Imagen
Landsat 8 OLI L1T	LC08_L1TP_009056_20160114_20170405_01_T1	38,9	14/01/2016	
Landsat 8 OLI L1T	LC08_L1TP_009056_20160505_20170325_01_T1	56,11	05/05/2016	
Landsat 8 OLI L1T	LC08_L1TP_009056_20160521_20170324_01_T1	32,83	21/05/2016	
Landsat 8 OLI L1T	LC08_L1TP_009056_20160622_20170323_01_T1	28,66	22/06/2016	
Landsat 8 OLI L1T	LC08_L1TP_009056_20161028_20170319_01_T1	46,49	28/10/2016	

En la Figura 9 se puede visualizar una imagen completa LANDSAT 8 OLI/TIRS y en el cuadro rojo se presenta la zona de estudio Valle de Aburrá.

Figura 9. *Zona de estudio ubicada sobre imagen satelital*

Fuente: USGS, 2016

De la pagina web oficial del Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá se tomo la información sobre las estaciones de monitoreo como la ubicación y el tipo de particulas que mide, se seleccionaron las estaciones utiles para el estudio; para este analisis especificamente se descargaron los datos de PM_{10} de las fechas seleccionadas, en la Figura 10 se presenta la ubicación de las estaciones de monitoreo dentro de la zona de estudio como las muestra la pagina de monitoreo del SIATA.

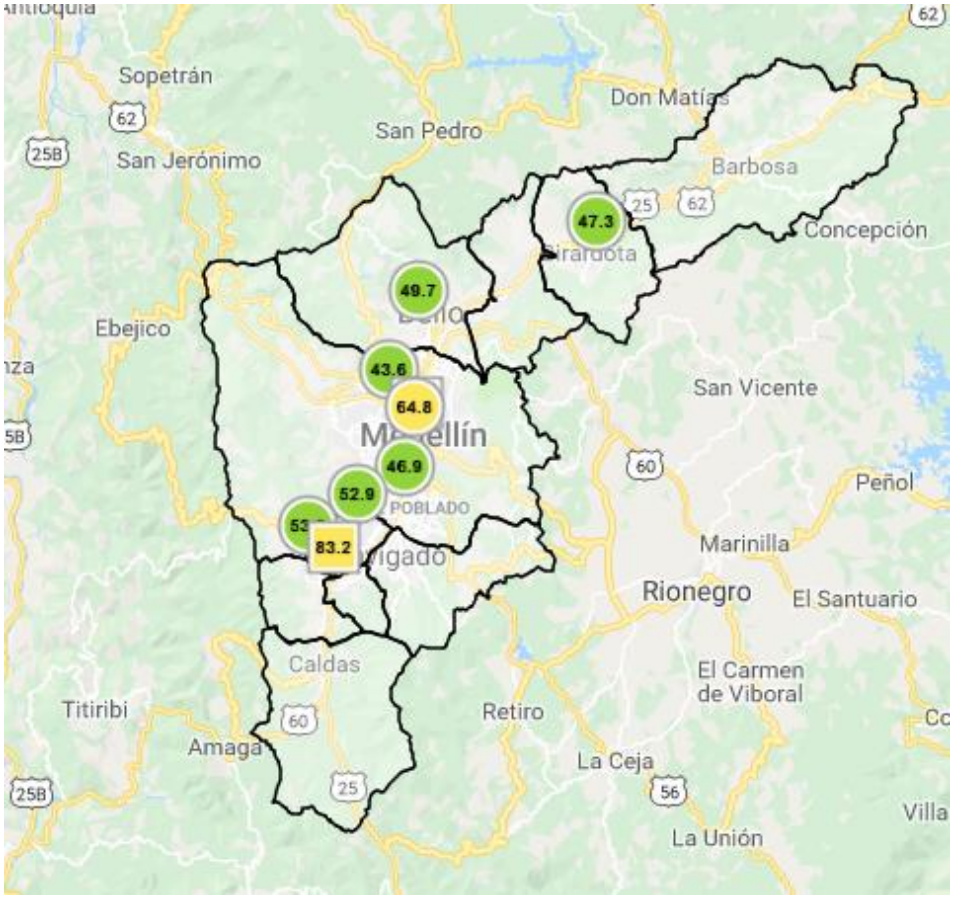


Figura 10. *Estaciones de monitoreo de PM_{10} Valle de Aburrá*

Fuente: SIATA, 2016

Se descargaron archivos *.txt* con los datos mensuales de las diferentes estaciones, se depuró la información hasta obtener el valor de PM_{10} para la misma fecha y hora en que fue adquirida la imagen Landsat 8. En la Tabla 5 se muestra el código de cada estación, por medio de este código el SIATA identifica cada estación, también expone el municipio en que se encuentra cada estación y las coordenadas de estas.

Tabla 5. *Listado estaciones de monitoreo con información de PM_{10}.*

Fuente: Elaboración propia, información tomada de SIATA 2016

CODIGO	MUNICIPIO	NOMBRE	LATITUD	LONGITUD
11	GIRARDOTA	Institución Educativa Colombia. Girardota	6° 22' 42.66"	75° 26' 38.34"
6	MEDELLIN	Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid	6° 12' 32.31"	75° 34' 39.95"
12	MEDELLIN	Estación Tráfico Centro	6° 15' 9.21"	75° 34' 10.48"
37	MEDELLIN	Universidad San Buenaventura	6° 19' 50.52"	75° 34' 7.21"
38	ITAGUI	I.E. Concejo Municipal de Itagüí	6° 10' 6.6"	75° 38' 39.69"
46	MEDELLIN	Éxito San Antonio	6° 14' 57.58"	75° 34' 12.9"

8. Metodología y desarrollo del proyecto

El esquema metodológico que se siguió en este estudio se observa en la Figura 11 En primer lugar, se expuso el procedimiento empleado para la obtención de los datos de entrada necesarios en la generación del modelo. En segundo lugar, se describen los tratamientos previos realizados a las imágenes Landsat 8 (correcciones atmosféricas). Posteriormente, se discuten las técnicas empleadas para la generación del modelo. Para lograr esto, fue necesario iniciar el análisis de los datos estudiando la relación entre la variable PM_{10} y las reflectancias obtenidas de las imágenes Landsat 8 (Lim, MatJafri, Abdullah, Saleh, & AlSultan, 2004), (Álvarez Mendoza, 2014), (Saleh & Hasan, 2014), (Wang & Christopher, 2003) utilizando para ello técnicas de regresión múltiple, en esto se basan los resultados. En tercer lugar, se validó el modelo de regresión, para ello se utilizó una imagen y 5 estaciones de monitoreo en tierra ya que la sexta estación no conto con datos disponibles en esta fecha. Para cada técnica que se presentó, la validación que se basó en el coeficiente de determinación (R^2), el error típico de la estimación, el error de validación y la desviación estándar fundados en la comparación de las observaciones de PM_{10} medidas en las estaciones terrestres y el PM_{10} estimado por el modelo de regresión.

El último paso fue utilizar la información procedente de las imágenes Landsat 8 y la ecuación de regresión con mejor ajuste para estimar el PM_{10}. Esta última fase del trabajo permitió obtener un mapa clasificado por PM_{10} para toda el área de estudio para cada fecha.

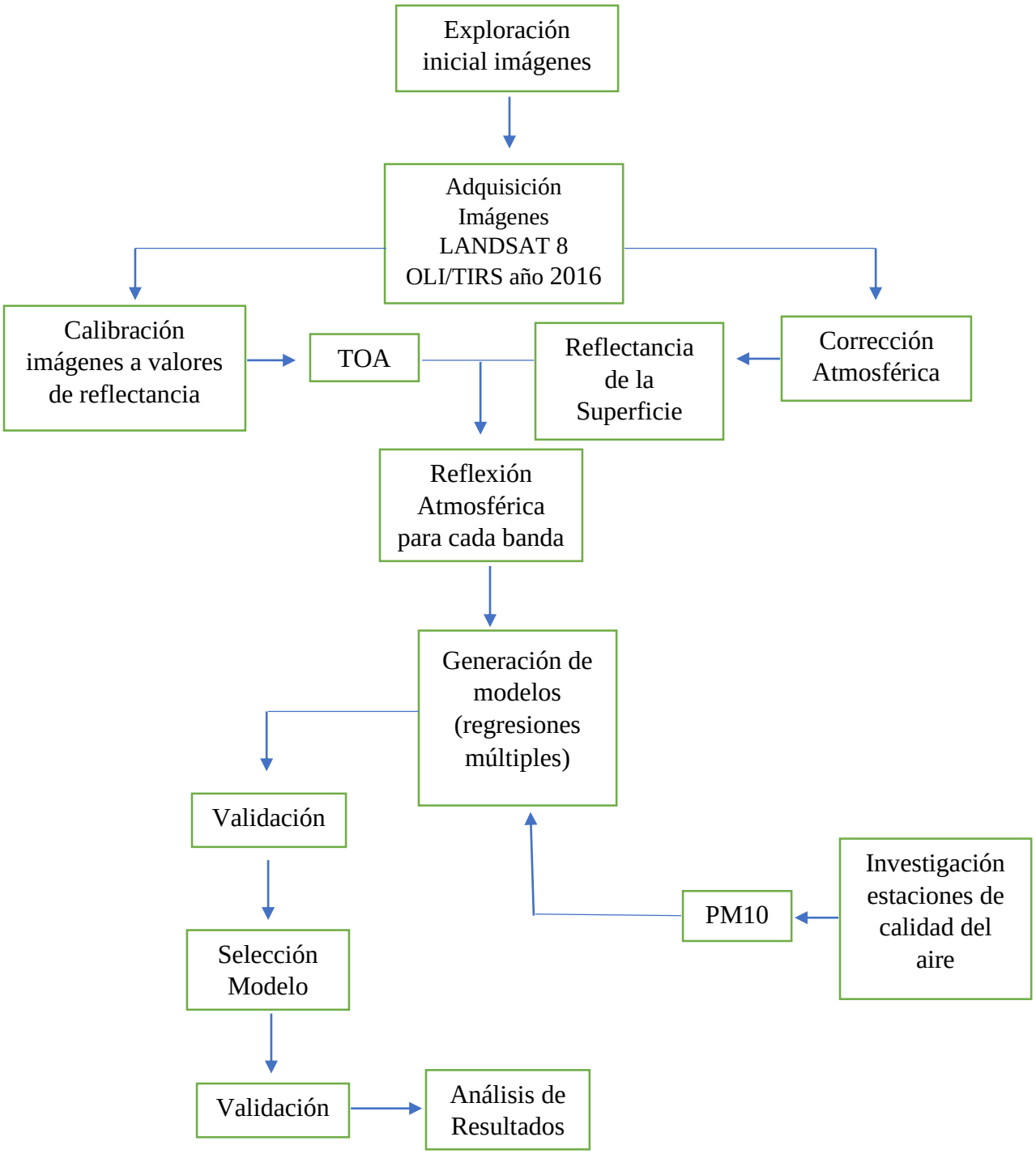


Figura 11. *Esquema metodológico*

Fuente: Elaboración propia

8.1. Información Estaciones de Monitoreo de Calidad de aire

Con las imágenes se procedió a buscar las estaciones de las redes de monitoreo de calidad de aire del Valle de Aburra que tuvieran información de PM_{10} tomado el mismo día de la adquisición de las imágenes, esta información se tomó de la página de internet del SIATA (Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá), los resultados son archivos .txt con el dato del PM_{10} de cada estación, este dato se encuentra en el archivo para cada hora, para todos los días del mes del cual se solicitó la información, en este archivo también se encuentra la calidad del dato para así verificar que tan confiable es el mismo, donde 1 es muy confiable, 0 es poco confiable y 9999 significa que no hay dato. Finalmente, del archivo solo se toma el dato obtenido a las 10:00 horas teniendo en cuenta que LANDSAT 8 OLI/TIRS pasa sobre el ecuador de 10:00 a 10:15 hora local (Roy et al., 2014). La información se filtró y se generó un cuadro en el que se relacionó cada estación de la red de monitoreo de calidad del aire de los días de toma de la información y el valor de PM_{10} en esta. En la estación I.E. Concejo Municipal de Itagüí para el 22 de junio no se encontró información por lo que esa estación no se tuvo en cuenta para ese día.

En la Tabla 6 se presenta el código, municipio y nombre de las estaciones que cuentan con información de PM_{10} en las fechas de toma de las imágenes satelitales, también se muestra el valor de PM_{10} (µg/m3) tomado por las estaciones de calidad de aire en tierra sobre las 10:00 am y la fecha.

Tabla 6. *Listado PM_{10} para cada estación.*

Fuente: Elaboración propia.

CODIGO	MUNICIPIO	NOMBRE	PM_{10} (µg/m3) 10:00 am	FECHA
11	GIRARDOTA	Institución Educativa Colombia. Girardota	37	14/01/2016
6	MEDELLIN	Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid	57	
12	MEDELLIN	Estación Tráfico Centro	79	
37	MEDELLIN	Universidad San Buenaventura	64	
38	ITAGUI	I.E. Concejo Municipal de Itagüí	80	
46	MEDELLIN	Exito San Antonio	74	
11	GIRARDOTA	Institución Educativa Colombia. Girardota	48	05/05/2016
6	MEDELLIN	Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid	66	
12	MEDELLIN	Estación Tráfico Centro	89	
37	MEDELLIN	Universidad San Buenaventura	69	
38	ITAGUI	I.E. Concejo Municipal de Itagüí	100	
46	MEDELLIN	Exito San Antonio	103	
11	GIRARDOTA	Institución Educativa Colombia. Girardota	25	21/05/2016
6	MEDELLIN	Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid	30	
12	MEDELLIN	Estación Tráfico Centro	58	
37	MEDELLIN	Universidad San Buenaventura	56	
38	ITAGUI	I.E. Concejo Municipal de Itagüí	32	
46	MEDELLIN	Exito San Antonio	45	
11	GIRARDOTA	Institución Educativa Colombia. Girardota	28	22/06/2016
6	MEDELLIN	Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid	36	
12	MEDELLIN	Estación Tráfico Centro	66	
37	MEDELLIN	Universidad San Buenaventura	59	
46	MEDELLIN	Exito San Antonio	64	
11	GIRARDOTA	Institución Educativa Colombia. Girardota	34	28/10/2016
6	MEDELLIN	Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid	40	
12	MEDELLIN	Estación Tráfico Centro	66	
37	MEDELLIN	Universidad San Buenaventura	48	
38	ITAGUI	I.E. Concejo Municipal de Itagüí	91	
46	MEDELLIN	Exito San Antonio	62	

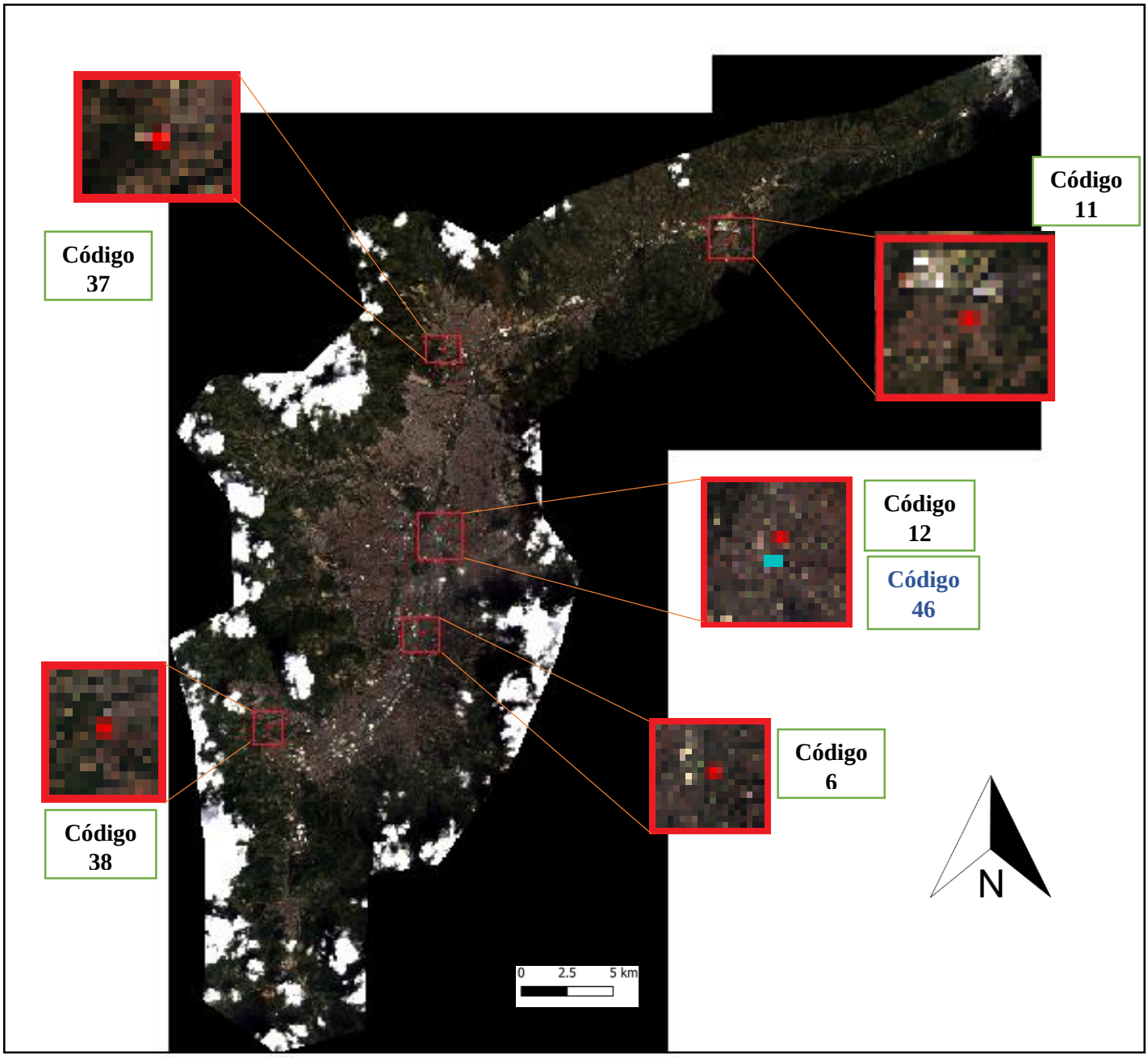


Figura 12. *Ubicación grafica estaciones de monitoreo*

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 12 se observar la ubicación de las diferentes estaciones de monitoreo a lo largo del área de interés Valle de Aburra resaltadas con un punto rojo, los números dentro de los cuadros

verdes son el código de cada estación, las estaciones 12 y 46 están muy cerca una de la otra por lo que la 46 está resaltada con un punto azul, cada estación tiene un acercamiento para su mejor identificación.

8.2. Calibración de Imágenes

Se procedió por medio del software de procesamiento digital de imágenes ENVI (*Environment for Visualizing Images*) realizar la calibración de cada imagen Landsat 8 con base en los metadatos de las mismas. A las 5 imágenes individualmente, se le realizó la calibración a reflectancia de las bandas multiespectrales, esto significa, convertir los ND (niveles digitales) originales de cada banda de la imagen Landsat-8 a valores de reflectancia en el techo de la atmosfera (R_{TOA}). Este valor se extrajo por medio de la región de interés definida por la ubicación geográfica de cada estación en todas las imágenes. El procedimiento de calibración a valores de reflectancia R_{TOA} se desarrolla con base en la Ecuación 1, tomada de (Mather & Koch, 2011):

$$\rho_\lambda = R_{TOA} = \frac{\pi L_\lambda d^2}{ESUN_\lambda sin\ \theta}$$

donde:

L_λ = Radiancia en unidades de W/(m²*sr*µm)

d = Distancia Tierra-Sol, en unidades astronómicas

$ESUN_\lambda$ = Irradiancia Solar en unidades de W/(m² *µm)

θ = Elevación solar en grados

Ecuación 1. *Reflectancia en el techo de la atmósfera*

Cada valor de las variables de la ecuación se encuentra en los metadatos de la imagen y cada imagen tiene valores diferentes, ENVI toma automáticamente los datos para calibrar la imagen.

El segundo tratamiento a las imágenes Landsat-8 fue convertir los valores de radiancia a reflectancia de superficie y corregirle los efectos producidos por la atmósfera. Para ello se requirio el uso de modelos de transferencia radiativa (implementado en el programa FLAASH de ENVI), con el objeto de transformar los datos originales de radiancia en valores de reflectancia. Con ello, se consiguen eliminar los efectos atmosféricos, topográficos y cualquier anomalía electrónica provocada por el sensor.

En esta investigación, se utilizó el programa de corrección atmosférica llamado FLAASH (Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes) desarrollado por el Air Force Research Laboratory, Space Vehicles Directorate (AFRL/VS), Hanscom AFB and Spectral Sciences, Inc. (SSI), el cual está basado en el modelo de transferencia radiativa MODTRAN4 (Moderate Resolution Transmittance 4) (Berk et al., 2002). Los objetivos principales de este modelo son, en primer lugar, eliminar de la radiancia recibida por el sensor, los efectos de absorción y dispersión de la energía electromagnética, causados por las moléculas y partículas atmosféricas en suspensión y, en segundo lugar, convertir esa radiancia en valores de reflectancia de la superficie (Cooley T y Anderson, 2002). El programa FLAASH procesa la radiancia de las imágenes que cubren el espectro solar, desde las longitudes de onda del ultravioleta hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR), omitiendo las emisiones térmicas.

De esta manera, la radiancia espectral L^* en un píxel del sensor es definida por medio de los siguientes parámetros:

$$L^* = \left(\frac{A\rho}{1-\rho_e S} \right) + \left(\frac{B\rho_e}{1-\rho_e S} \right) + L_a^*$$

Ecuación 2. *Reflectancia de superficie* (ρ) *Fuente:* (Berk et al., 2002)

donde ρ es la reflectancia de la superficie en el píxel, ρ_e es un promedio de la reflectancia de la superficie en una región circundante al píxel, S es el albedo esférico de la atmósfera, L^*_a es la radiancia aportada por la dispersión atmosférica que no ha alcanzado la superficie, y A y B son coeficientes independientes de la superficie y que varían con las condiciones atmosféricas y geométricas. Todas las variables de la ecuación son dependientes de la longitud de onda. La primera parte de la ecuación (2) corresponde a la radiancia que sale de la superficie y llega directamente al sensor, y la segunda parte, corresponde a la radiancia de la superficie que es dispersada por la atmósfera antes de llegar al sensor. La diferencia entre ρ y ρ_e viene dada por los efectos de adyacencia (radiancia dispersada procedente de píxeles cercanos). Los valores de A, B, S y L^*_a son determinados por el algoritmo MODTRAN4, el cual requiere para sus cálculos algunos parámetros de entrada: ángulo solar, ángulo de observación, elevación promedio de la superficie, modelo atmosférico estándar, tipo de aerosol y el rango de visibilidad horizontal, estos datos se obtienen de los metadatos de cada imagen (Berk et al., 2002); Después de obtener las variables atmosféricas se despeja en la ecuación (2) las reflectancias de superficie de cada píxel, en todos los canales del sensor.

Finalmente se relaciona la reflectancia de la superficie y el espesor óptico de aerosoles por medio de la ecuación propuesta por (Kaufman & Tanré, 1998):

$$Ratm\ (\lambda) = R_{TOA}(\lambda) - Rs\ (\lambda)$$

Ecuación 3. *Reflectancia Atmosférica. Fuente:* (Kaufman & Tanré, 1998)

donde:

$Ratm\ (\lambda)$ es la reflectancia atmosférica para la banda λ de la imagen

$R_{TOA}(\lambda)$ es la reflectancia en la parte superior (techo) de la atmosférica en el sensor

$Rs\ (\lambda)$ Reflectancia de la superficie

Teniendo la reflectancia atmosférica para cada banda -$Ratm\ (\lambda)$- para cada estación en las imágenes y basándose en las teorías de dispersión de energía provocada por partículas Mie (Othman et al., 2010) propusieron un algoritmo para PM_{10} presente en la troposfera, el cual se aplica suponiendo que existe una equivalencia entre las características del AOT (Espesor Óptico de Aerosoles) y el PM_{10}, este planteamiento ha sido considerado en varias ocasiones por diferentes autores y sugiere que tienen correlación lineal (Sifakis, Soulakellis, Paronis, & Mavrantza, 1998), (Bilguunmaa, Batbayar, & Tuya, 2014), (Álvarez Mendoza, 2014):

$$AOT(\lambda) = a_0 * Ratm(\lambda 1) + a_1 * Ratm(\lambda 2) + a_2 * Ratm(\lambda 3) + \ldots$$

Ecuación 4. *AOT (λ), Fuente:* (Sifakis et al., 1998)

donde:

$AOT(\lambda)$ es el mismo PM_{10} y es la variable dependiente del análisis

$Ratm(\lambda)$ es la reflectancia atmosférica de cada banda de la imagen

a es el coeficiente de regresión asociado a cada variable independiente en las diferentes bandas

8.3. Generación de Modelos

La técnica estadística de regresión lineal múltiple RLM, nos permite analizar la relación lineal entre una variable dependiente (Y) (en este caso el PM_{10}) observado y un conjunto k de variables independientes (X_1, X_2, … X_k) (en este caso, valores de reflectancias atmosféricas en longitudes de onda). El resultado de este método estadístico será la identificación de las variables independientes que mejor expliquen la variabilidad de la variable dependiente, ofreciendo una ecuación lineal que combina los valores del conjunto de datos de las variables independientes con los coeficientes (b_0, $b_{1=1,k}$) establecidos por la regresión. De esta forma, la ecuación lineal determinada por la regresión será expresada de la manera siguiente (Johnson A., 1988):

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + ... + b_k X_k$$

Ecuación 5. *Regresión Lineal Múltiple*

En la presente investigación se utilizó la regresión lineal múltiple para obtener la relación entre PM_{10} medido en las estaciones en el terreno y los datos espectrales de las imágenes Landsat-8. Las ecuaciones de regresión lineal fueron desarrolladas a partir de los valores de reflectancia atmosférica de las bandas de las imágenes.

El programa estadístico utilizado en el análisis fue el software *RStudio*. Para ello, se obtuvo una matriz de datos con 24 observaciones de 4 imágenes y 6 estaciones con 5 variables considerando las 5 primeras bandas de las imágenes de Landsat 8 descritas anteriormente, con todos estos datos se procedió a realizar diferentes regresiones lineales múltiples con las bandas 1, 2, 3, 4, y 5 y con 4 de las 5 imágenes ya que la quinta se usó para validar los resultados obtenidos, en la Figura 13

se muestra la ejecución del software; se crearon diferentes combinaciones de bandas para buscar el modelo con mayor R^2 y menor RMSE.

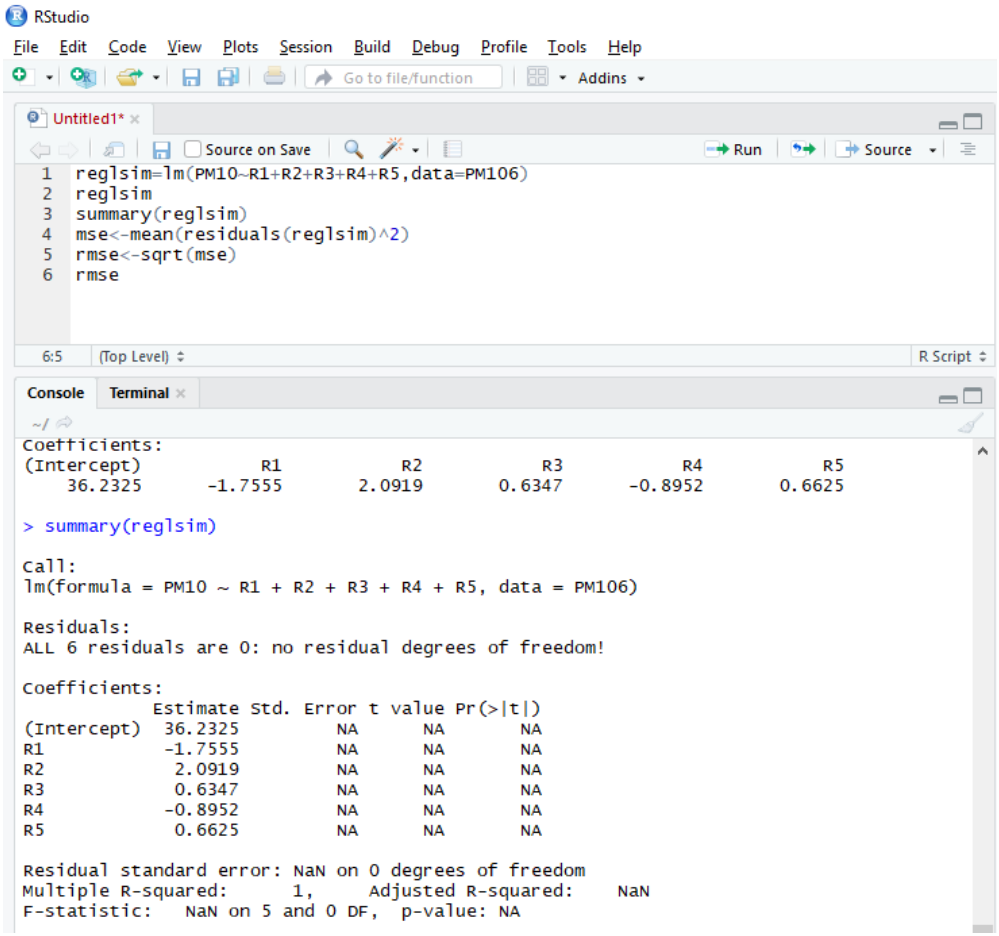


Figura 13. *Procesamiento de datos en RStudio*

Fuente: Elaboración propia.

8.4. Técnica de validación

La validación inicial de todos los modelos generados se realiza con base en los modelos con mayor coeficiente de determinación (R^2) y menor error típico de la estimación, así se obtienen los mejores 10 modelos.

Para validar los 10 modelos que resultaron del proceso anterior, se usó la imagen del 22 de junio del 2016 ya que está no se utilizó en la generación de los mismos, para esta imagen se contó con 5 estaciones de monitoreo con sus respectivos valores de PM_{10} observado y el PM_{10} estimado, este último dato se obtuvo para cada uno de los 10 modelos seleccionados. De esta manera, se buscó analizar, para la validación, la relación estadística del valor del PM_{10} observado en las estaciones meteorológicas con el PM_{10} estimado de la aplicación de los diez mejores modelos sobre la imagen de validación, obteniendo el error de validación, es decir, los residuales de los dos valores de PM_{10} promedio para cada estación y la desviación estándar, se procede a seleccionar el modelo con los mejores resultados que será el modelo final que aplicaremos a todas las imágenes del estudio.

9. Resultados

Con el procesamiento ya descrito en la metodología y desarrollo del proyecto, se obtuvieron los modelos generados por la combinación de las diferentes bandas, para cada imagen se crearon 30 modelos, junto con el error de la raíz cuadrada de la media (RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2). Las variables independientes B1, B2, B3, B4 y B5 son las reflectancias atmosféricas para cada banda: aerosol, azul, verde, rojo e infrarrojo cercano, respectivamente (Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10):

Tabla 7. *Modelos del 14 de enero del 2016 para todas las estaciones*

Fuente: Elaboración propia

Mod No.	MODELO	R^2	RMSE
1	PM10= 0.06259 B1 + 27.30711	0,173	13,65
2	PM10= 0.0407 B2 + 45.6727	0,024	14,82
3	PM10= 0.01666 B3 + 63.14984	0,008	14,94
4	PM10= 0.2384 B4 + 40.5539	0,846	5,88
5	PM10= (-0.4469) B5 + 61.7646	0,353	12,06
6	PM10= 0.08285 B1 + (-0.05372) B2 + 40.78266	0,197	13,44
7	PM10= 0.07096 B1 + 0.03951 B3 + 17.45934	0,215	13,29
8	PM10= (-0.05808) B1 + 0.30627 B4 + 68.67692	0,926	4,07
9	PM10= (-0.01861) B1 + (-0.51937) B5 + 72.46647	0,359	12,00
10	PM10= 0.03900 B2 + 0.01434 B3 + 44.74783	0,030	14,77
11	PM10= (-0.05539) B2 + 0.25859 B4 + 65.00167	0,884	5,09
12	PM10= 0.01775 B2 + (-0.43921) B5 + 53.32059	0,358	12,01
13	PM10= 0.1267 B3 + (-0.7514) B5 + 44.1020	0,656	8,79
14	PM10= 0.3098 B4 + 0.2624 B5 + 35.1727	0,891	4,93
15	PM10= 0.04856 B3 + 0.25046 B4 + 33.42722	0,912	4,44
16	PM10= 0.1084 B1 + (-0.0896) B2 + 0.0569 B3 + 35.6019	0,274	12,78
17	PM10= (-0.04971) B1 + 0.03967 B3 + 0.30634 B4 + 58.79763	0,969	2,64
18	PM10= (-0.08547) B1 + 0.15955 B3 + (-1.16329) B5 + 88.68789	0,762	7,32
19	PM10= (-0.04857) B1 + (0.32369) B4 + 0.10477 B5 + 61.91923	0,931	3,92
20	PM10= (-0.05273) B1 + (-0.01238) B2 + 0.30453 B4 + 71.54698	0,927	4,03
21	PM10= (-0.1357) B1 + 10.1476 B2 + (--0.9119) B5 + 69.5568	0,434	11,28
22	PM10= (-0.06906) B2 + 0.05611 B3 + 0.27753 B4 + 62.79799	0,971	2,55
23	PM10= (-0.01452) B2 + 0.12947 B3 + (-0.76422) B5 + 50.62901	0,659	8,76
24	PM10= (-0.07481) B2 + 0.35901 B4 + 0.34264 B5 +66.54118	0,958	3,06
25	PM10= 0.04175 B3 + 0.26485 B4 + 0.05904 B5 + 33.21653	0,913	4,41
26	PM10= (-0.02921) B1 + (-0.04327) B2 + 0.04807 B3 + 0.30026 B4 + 66.73939	0,982	1,99
27	PM10= 0.03842 B1 + (-0.11570) B2 + 0.37494 B4 + 0.51117 B5 + 62.52949	0,963	2,87
28	PM10= (-0.3167) B1 + 0.2719 B2 + 0.1969 B3 +(-2.0368) B5 + 87.1286	0,994	1,13
29	PM10= (-0.07296) B1 + 0.07438 B3 + 0.25046 B4 + (-0.33663) B5 + 71.86784	0,989	1,52
30	PM10= (-0.2164) B1 + 0.1605 B2 + 0.1439 B3 + 0.1109 B4 + (-1.3130) R5 + 80.3191	1,000	0,00

Tabla 8. *Modelos del 21 de junio del 2016 para todas las estaciones.*

Fuente: Elaboración propia

Mod No.	MODELO	R^2	RMSE
1	PM10= 0.03312 B1 + 25.45349	0,130	11,96
2	PM10= 0.03488 B2 + 26.20529	0,074	12,34
3	PM10= 0.1342 B3 + 33.2572	0,493	9,13
4	PM10= 0.1369 B4 + 30.7821	0,355	10,30
5	PM10= 0.4244 B5 + 44.6876	0,486	9,19
6	PM10= 0.07052 B1 + (-0.05643) B2 + 31.82821	0,158	11,77
7	PM10= 0.002571 B1 + 0.131628 B3 + 32.200126	0,493	9,12
8	PM10= (-0.02867) B1 + 0.19426 B4 + 39.95879	0,390	10,01
9	PM10= (-0.08153) B1 + 0.88850 B5 + 86.99654	0,697	7,06
10	PM10= 0.002353 B2 + 0.132943 B3 + 32.333224	0,493	9,13
11	PM10= (-0.1318) B2 + 0.3432 B4 + 71.3109	0,609	8,01
12	PM10= -0.1522 B2 + 1.0420 B5 + 114.6371	0,870	4,61
13	PM10= 0.07939 B3 + 0.24230 B5 + 38.52612	0,569	8,41
14	PM10= (-0.09898) B4 + 0.66906 B5 + 54.20134	0,510	8,97
15	PM10= 0.10407 B3 + 0.08075 B4 + 28.96977	0,592	8,19
16	PM10= 0.006026 B1 + (-0.004931) B2 + 0.130827 B3 + 32.716158	0,494	9,12
17	PM10= (-0.04863) B1 + 0.12010 B3 + 0.16941 B4 + 44.25893	0,688	7,15
18	PM10= (-0.07252) B1 + 0.03748 B3 + 0.75123 B5 + 79.40929	0,712	6,87
19	PM10= (-0.08191) B1 + (-0.10294) B4 + 1.14518 B5 + 97.08971	0,722	6,75
20	PM10= 0.08043 B1 + (-0.24005) B2 + .35164 B4 + 78.82939	0,718	6,80
21	PM10= (-0.003259) B1 + (-0.148973) B2 + 1.047297 B5 + 114.826026	0,870	4,61
22	PM10= (-0.19766) B2 +(-0.07376) B3 + 1.39541 B5 + 141.22923	0,908	3,88
23	PM10= (-0.1247) B2 + 0.0980 B3 + 0.2792 B4 + 67.4137	0,818	5,46
24	PM10= (-0.16336) B2 + 0.07228 B4 + 0.90842 B5 + 112.79891	0,881	4,41
25	PM10= 0.2170 B3 + 0.3556 B4 + (-0.9524) B5 - 6.3349	0,627	7,82
26	PM10= 0.03787 B1 + (-0.17675) B2 + 0.08298 B3 + 0.29297 B4 + 71.55071	0,838	5,16
27	PM10= 0.01263 B1 + (-0.17858) B2 + 0.08884 B4 + 0.85732 B5 + 111.64563	0,883	4,38
28	PM10= 0.01038 B1 + (-0.21051) B2 + (-0.07772) B3 + 1.39754 B5 + 42.05471	0,909	3,85
29	PM10= -0.1288 B1 + (-0.1887) B3 + (-0.5005) B4 + 2.8276 B5 + 174.2667	0,742	6,51
30	PM10= (-0.07676) B1 + (-0.25014) B2 + (-0.51246) B3 + (-0.91413) B4 + 5.31139 B5 + 327.08934	1,000	0,00

Tabla 9. *Modelos del 28 de octubre del 2016 para todas las estaciones.*

Fuente: Elaboración propia

Mod No.	MODELO	R^2	RMSE
1	PM10= (-0.09535) B1 + 98.22744	0,441	14,18
2	PM10= (-0.09793) B2 + 95.10298	0,241	16,52
3	PM10= (-0.3249) B3 + 76.2516	0,894	6,15
4	PM10= 0.1574 B4 + 46.0730	0,082	18,18
5	PM10= 0.1043 + 58.6481	0,039	18,59
6	PM10= (-0.4364) B1 + 0.4887 B2 + 55.3293	0,814	8,18
7	PM10= (-0.02316) B1 + (-0.29208) B3 + 4.34574	0,911	5,63
8	PM10= (-0.09347) B1 + 0.01852 B4 + 96.14582	0,442	14,16
9	PM10= (-0.09433) B1 + 0.01416 B5 + 98.03222	0,442	14,17
10	PM10= (-0.02736) B2 + (-0.30611) B3 + 85.82182	0,910	5,67
11	PM10= (-0.08885) B2 + 0.08647 B4 + 85.64534	0,264	16,27
12	PM10= (-0.09420) B2 + 0.03502 B5 + 94.25504	0,246	16,47
13	PM10= (-0.32315) B3 + 0.01436 B5 + 76.39847	0,895	6,13
14	PM10= 0.14441 B4 + 0.02036 B5 + 47.31808	0,083	18,17
15	PM10= (-0.325104) B3 + (-0.001204) B4 + 76.347582	0,894	6,15
16	PM10= (-0.05304) B1 + 0.03675 B2 + (-0.27499) B3 + 81.93215	0,912	5,62
17	PM10= (-0.02510) B1 + (-0.29377) B3 + (-0.02321) B4 + 86.87452	0,913	5,58
18	PM10= (-0.0230984) B1 + (-0.2920582) B3 + 0.0009349 B5 + 84.3340852	0,911	5,63
19	PM10= (-0.093416) B1 + 0.014303 B4 + 0.006718 B5 + 96.527455	0,442	14,16
20	PM10= (-0.4995) B1 + 0.5589 B2 + (-0.1385) B4 + 64.7309	0,860	7,08
21	PM10= (-0.43848) B1 + 0.49685 B2 + 0.05074 B5 + 53.91515	0,822	7,98
22	PM10= (-0.027465) B2 + (-0.306174) B3 + (-0.001123) B5 + 85.847110	0,910	5,67
23	PM10= (-0.02850) B2 +(-0.30834) B3 + (-0.01579) B4 + 87.48134	0,911	5,64
24	PM10= (-0.08964) B2 + 0.09761 B4 + (-0.01837) B5 + 84.87243	0,265	16,26
25	PM10= (-0.32516) B3 + (-0.01603) B4 + 0.02312 B5 + 77.76672	0,896	6,11
26	PM10= (-0.12210) B1 + 0.11672 B2 + (-0.24131) B3 + (-0.04855) B4 + 81.96996	0,916	5,48
27	PM10= (-0.5915) B1 + 0.6881 B2 + (-0.3201) B4 + 0.2313 B5 + 70.6107	0,960	3,76
28	PM10= (-0.05616) B1 + 0.04098 B2 + (-0.27289) B3 + 0.00482 B5 + 81.59462	0,912	5,61
29	PM10= (-0.02486) B1 + (-0.29411) B3 + (-0.03534) B4 + (0.01922) B5 + 87.95572	0,914	5,56
30	PM10= (-1.7555) B1 + 2.0919 B2 + 0.6347 B3 + (-0.8952) B4 + 0.6625 R5 + 36.2325	1,000	0,00

Tabla 10. *Modelos del 5 de mayo del 2016 para todas las estaciones.*

Fuente: Elaboración propia.

Mod No.	MODELO	R^2	RMSE
1	PM10= 0.09019 B1 + 40.27345	0,561	13,09
2	PM10= 0.09267 B2 + 41.88713	0,318	16,32
3	PM10= 0.1609 B3 + 68.4964	0,300	16,54
4	PM10= 0.2314 B4 + 62.1445	0,520	13,65
5	PM10= 0.5705 B5 + 88.2788	0,370	15,69
6	PM10= 0.1636 B1 + (-0.1103) B2 + 52.9782	0,640	11,86
7	PM10= 0.07739 B1 + 0.05655 B3 + 42.04233	0,587	12,70
8	PM10= 0.06663 B1 + 0.06786 B4 + 45.43872	0,568	12,99
9	PM10= 0.08775 B1 + 0.02375 B5 + 41.70361	0,562	13,08
10	PM10= 0.06798 B2 + 0.11369 B3 + 44.27920	0,445	14,72
11	PM10= (-0.08122) B2 + 0.37449 B4 + 84.29100	0,567	13,00
12	PM10= 0.03407 B2 + 0.41283 B5 + 72.05420	0,384	15,51
13	PM10= 0.05978 B3 + 0.42566 B5 + 82.00059	0,387	15,47
14	PM10= 0.3725 B4 + (-0.4448) B5 + 44.6575	0,553	13,21
14	PM10= 0.3865 B3 + (-0.2346) B4 + 41.55650	0,458	14,81
15	PM10= 0.15082 B1 + (-0.10034) B2 + 0.02721 B3 + 52.68490	0,645	11,77
16	PM10= 0.06224 B1 + 0.05314 B3 + 0.04588 B4 + 45.42790	0,590	12,65
17	PM10= 0.09318 B1 + 0.08864 B3 + (-0.22473) B5 + 29.51575	0,600	12,50
18	PM10= 0.05315 B1 + 0.18493 B4 + (-0.26471) B5 + 38.41155	0,577	12,85
19	PM10= 0.1208 B1 + (-0.1483) B2 + 0.1961 B4 + 72.2829	0,686	11,07
20	PM10= 0.1547 B1 + (-0.1264) B2 + 0.1915 B5 + 66.3700	0,653	11,63
21	PM10= (-0.06672) B2 + 0.03812 B3 + 0.32542 B4 + 79.53726	0,577	12,85
22	PM10= 0.08648 B2 + 0.14212 B3 + (-0.17381) B5 + 32.17689	0,449	14,67
23	PM10= (-0.09815) B2 + 0.58583 B4 + (-0.57209) B5 + 66.41645	0,615	12,25
24	PM10= 0.2591 B3 +70.6630 B4 + (-1.8641) B5 - 16.5721	0,772	9,42
25	PM10= 0.121335 B1 + (-0.149239) B2 + (-0.001774) B3 + 0.197640 B4 + 72.455008	0,686	11,07
26	PM10= 0.1070 B1 + (-0.1487) B2 + 0.3182 B4 + (-0.2752) B5 + 65.0608	0,696	10,90
27	PM10= 0.16315 B1 + (-0.14566) B2 + (-0.02839) B3 + 0.29662 B5 + 74.02535	0,655	11,60
28	PM10= (-0.1192) B1 + 0.3942 B3 + 1.2350 B4 + (-3.0077) B5 - 34.4852	0,833	8,07
29	PM10= (-0.7158) B1 + 0.5385 B2 + 1.3132 B3 + 3.2005 B4 + (-9.3644) B5 - 300.9064	1,000	0,00

En la Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10 las filas de los modelos señalados con amarillo son los 5 mejores por imagen, los cuales presentaron mejor ajuste, teniendo en cuenta que el RMSE no fuera mayor a 8.9 (entre más pequeño sea este valor más cercanos son los valores predichos a los observados) y el R^2 no fuera menor a 0.6 (este valor debe ser cercano a 1 para que el algoritmo este ajustado correctamente a la variable real), las imágenes se comportaron de forma diferente, algunas con solo 2 bandas presentaban buenos resultados y otras mostraron resultados poco precisos. Ya con los modelos con mejores resultados se procede a hacer la validación de estos, para seleccionar el mejor, y posteriormente graficar el modelo final para cada una de las imágenes analizadas.

10. Validación

Durante los días analizados, los cuales se presentan en la Tabla 11:

Tabla 11. *Fecha de adquisición imágenes*

Fuente: Elaboración propia.

FECHA DE ADQUISICIÓN
14/01/2016
05/05/2016
21/05/2016
22/06/2016
28/10/2016

Los rangos de PM_{10} variaron entre 35 ($\mu g/m^3$) y 103 ($\mu g/m^3$) lo cual según el índice de calidad del aire de la secretaria de salud está entre calidad de aire buena (0 – 54) y calidad de aire moderada (55-154) esto implica que durante estas fechas no se presentaron alertas por contaminación de aire y los modelos generados se hicieron con valores de PM_{10} bajos.

De los 20 modelos filtrados se seleccionaron 10 teniendo en cuenta que el RMSE no fuera mayor a 6 y el R^2 no fuera menor a 0.9, se seleccionaron los 5 mejores con 3 bandas y los 5 mejores con 4 bandas. Teniendo los mejores 10 modelos se procedió a validar por medio de la quinta imagen que no fue usada para la generación de estos, esta quinta imagen fue tomada el 22 de junio del 2016, para ver el comportamiento los modelos, esta información se presenta en las Tabla 12 y Tabla 13, donde se buscó relacionar el error que tiene el modelo cuando se compara con el PM_{10} medido en campo por las estaciones de monitoreo de calidad del aire, a este error se le denomino

ERROR DE VALIDACIÓN, en amarillo se resaltó el que menos error y menos desviación estándar tuvo o sea el que más cerca estaba de el PM_{10} medido en campo.

Tabla 12. *Validación modelos resultantes con 4 bandas*

Fuente: Elaboración propia

Mod. No.	PM_{10} (µg/m3) ESTIMADO (MODELO)	PM_{10} (µg/m3) OBSERVADO (ESTACIONES)	ERROR DE VALIDACIÓN	FECHA MODELO	ERROR DE VALIDACIÓN PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
26	38	28	10	14/01/2016	13,49	9,93
26	62	36	26			
26	67	66	1			
26	68	59	9			
26	43	64	21			
27	36	28	8	14/01/2016	13,09	9,62
27	56	36	20			
27	68	66	2			
27	68	59	9			
27	38	64	26			
28	46	28	18	14/01/2016	19,86	22,24
28	94	36	58			
28	62	66	4			
28	73	59	14			
28	70	64	6			
29	39	28	11	14/01/2016	14,02	11,11
29	66	36	30			
29	67	66	1			
29	69	59	10			
29	46	64	18			
22	38	28	10	14/01/2016	19,52	11,96
22	57	36	21			
22	67	66	36			
22	65	59	6			
22	39	64	25			

De la Tabla 12 se puede analizar que para 4 bandas la imagen que mejor resultado obtuvo fue la del 14 de enero ya que todos los modelos con mejor RMSE y R^2 resultaron de esta imagen, el

modelo numero 27 es el que menor error de validación promedio tiene, al verificar la imagen se visualiza que tiene poca nubosidad en la zona de interés del estudio y los valores de PM_{10} de la estación en tierra oscilan entre 28 y 66 ($\mu g/m^3$) esto facilita la generación del modelo.

Tabla 13. *Validación algoritmos resultantes con 3 bandas.*

Fuente: Elaboración propia.

NO. ALG	PM_{10} ESTIMADO (MODELO)	PM_{10} OBSERVADO (ESTACIONES)	ERROR DE VALIDACIÓN	FECHA MODELO	ERROR DE VALIDACIÓN PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
17	36	28	8	14/01/2016	13,27	11,37
17	67	36	31			
17	67	66	1			
17	69	59	10			
17	48	64	16			
22	38	28	10	14/01/2016	12,59	9,89
22	57	36	21			
22	67	66	1			
22	65	59	6			
22	39	64	25			
22	76	28	48	21/06/2016	20,42	16,92
22	30	36	6			
22	42	66	24			
22	50	59	9			
22	49	64	15			
24	60	28	32	21/06/2016	18,08	11,06
24	31	36	5			
24	48	66	18			
24	49	59	10			
24	39	64	25			
17	52	28	24	28/10/2016	21,42	21,12
17	65	36	29			
17	14	66	52			
17	58	59	1			
17	66	64	2			

En la Tabla 13 se visualizan los resultados de los modelos de 3 bandas, vuelve a ser significativa la presencia de 2 modelos de la imagen con fecha del 14 de enero del 2016 por razones explicadas anteriormente, aunque también hay presencia de modelos de otras 2 fechas. Se resalta con color amarillo las dos ecuaciones con mejores estadísticas, lo que significa que tienen menor error de validación y menor desviación estándar.

Para 4 bandas el mejor modelo es:

$$PM_{10} = 0.03842\ B1 + (-0.11570)\ B2 + 0.37494\ B4 + 0.51117\ B5 + 62.52949$$

Ecuación 6. *Modelo propuesto para 4 bandas. Fuente: Elaboración propia.*

Y para 3 bandas el mejor modelo es:

$$PM_{10} = (-0.06906)\ B2 + 0.05611\ B3 + 0.27753\ B4 + 62.79799$$

Ecuación 7. *Modelo propuesto para 3 bandas. Fuente: Elaboración propia.*

Los dos modelos obtenidos se generan de la misma imagen y tienen en común la banda 2, por lo que teniendo en cuenta la menor desviación estándar, el mejor modelo resultó con 4 bandas (banda 1: aerosol, banda 2: verde, banda 4: azul y banda 5: infrarrojo cercano).

$$\mathbf{PM_{10}\ (\mu g/m^3) = 0.03842\ (Banda\ 1) + (-0.11570)\ (Banda\ 2) + 0.37494\ (Banda\ 4) + 0.51117\ (Banda\ 5) + 62.52949}$$

Ecuación 8. *Modelo Resultado Final. Fuente: Elaboración propia.*

Este modelo presentó un coeficiente de determinación de Pearson (R^2) de 0.9 que es adecuado comparado con otros estudios que presentan valores de R^2 entre 0.6 y 0.8 (Amanollahi, Tzanis,

Abdullah, Ramli, & Pirasteh, 2013), (Parton, Morgan, Wang, & Del Grosso, 2007), (Gupta et al., 2006), (Othman et al., 2010), (Wang & Christopher, 2003), se debe tener en cuenta la cantidad de limitantes especialmente en el número de imágenes adecuadas para realizar una investigación como esta y las estaciones con la información que se requería para el desarrollo del modelo, por lo que podría mejorarse tomando un mayor número de imágenes y más estaciones de monitoreo en tierra en investigaciones futuras.

11. Discusión

Del modelo obtenido se puede observar la combinación de bandas con rangos espectrales distintos, es el caso de la banda 2 (Azul) que también se presentaba en el modelo óptimo con 3 bandas, la cual cubre longitudes de onda entre 0.452 y 0.512 µm y la banda 4 (Rojo) con longitudes de onda entre 0.636 y 0.673 µm, las dos dentro del espectro visible, son bandas que generalmente hacen presencia en los modelos generados para el cálculo de PM_{10} por medio de teledetección (King, Kaufman, Tanré, & Nakajima, 1999), (Feng et al., 2015), (Othman et al., 2010), (Wong, MatJafri, Abdullah, & Lim, 2009), ya que las bandas generalmente usadas corresponden al espectro visible; la banda 5 (Infrarrojo Cercano) con longitudes de onda entre 0.851 y 0.879 µm no está tan correlacionada como las dos anteriores pero de igual manera ha formado parte de modelos para la estimación de material particulado (Lim et al., 2004), (Abad Crespo, 2016), ya que la incorporación de bandas térmicas según el estudio de (Lim et al., 2004) mejoran la estimación de PM_{10}; finalmente la banda 1 (Costero/Aerosol) con longitudes de onda entre 0.435 y 0.451 µm es una banda técnicamente nueva pues las anteriores versiones de Landsat no la incluían y según estudios es útil para el estudio de la concentración de aerosoles en la atmósfera aunque no existe mucha información de resultados útiles hasta el momento (Roy et al., 2014) ; teniendo en cuenta todas las longitudes de onda de las bandas usadas en el modelo tiene sentido que se presente bandas del rango visible ya que la contaminación atmosférica se puede ver, aunque esto sea relativo porque la contaminación atmosférica está compuesta por varios contaminantes no solo PM10, y sabiendo que la contaminación del aire reacciona en épocas secas y de altas temperaturas son útiles las bandas del espectro térmico.

Se procedió a graficar el modelo por medio del software ENVI, se ingresó desde la opción de MATBAND y se obtuvieron como resultado la Figura 15, Figura 17, Figura 19 y Figura 21:

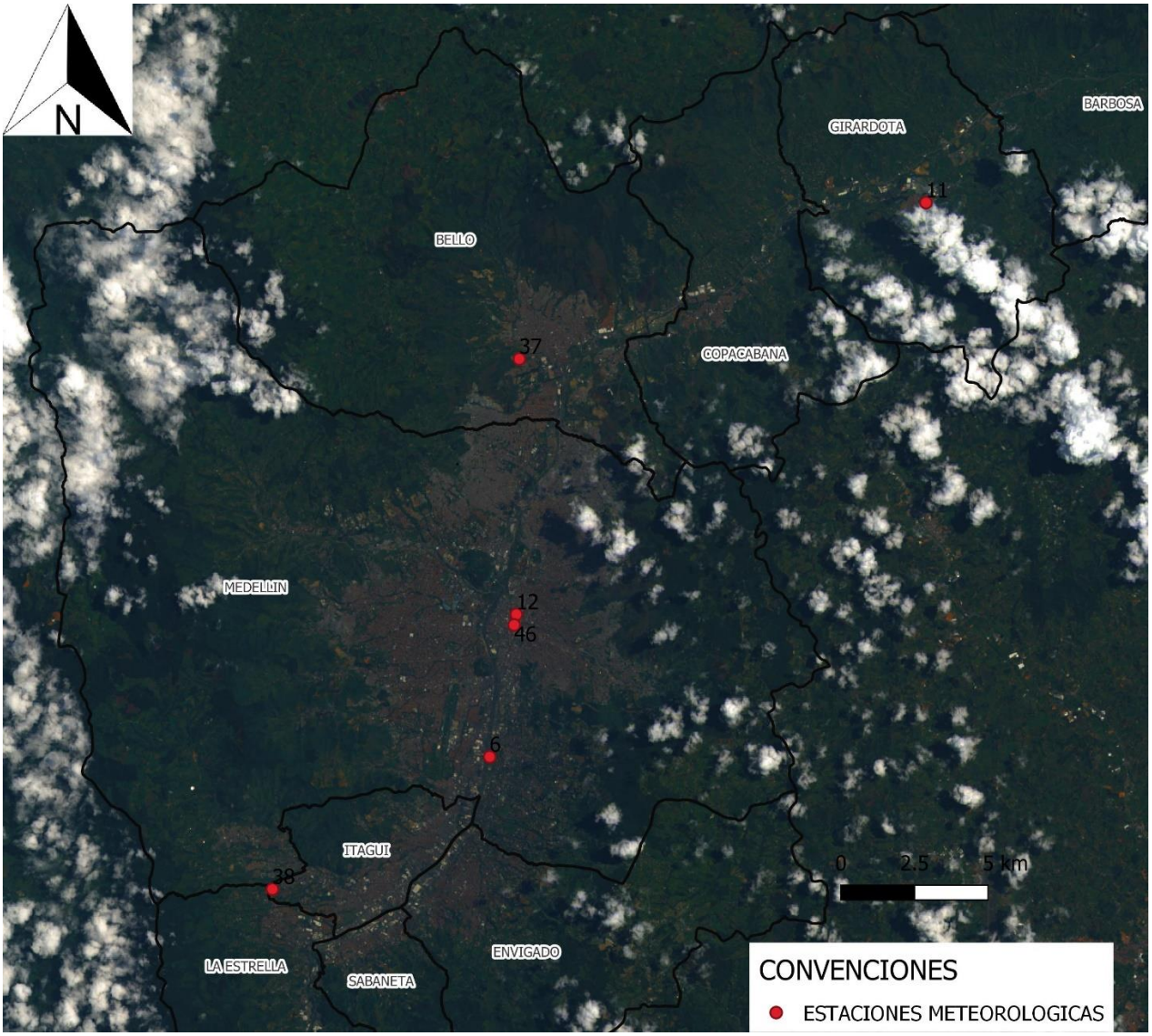


Figura 14. *Imagen 05 de mayo 2016*

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 14 se presenta la visualización general de la zona de influencia para la imagen del 5 de mayo del 2016, también se muestran los municipios y la ubicación de las estaciones meteorológicas y de medición de calidad del aire en tierra y el numero en las estaciones es el código de cada una de ellas.

Tabla 14. *Índice Calidad del aire (PM_{10}).*

Fuente: secretaria de salud

CLASIFICACIÓN		RANGO PM_{10} **µg/m³**
	BUENA	0-54
	MODERADA	55-154
	DAÑINA PARA GRUPOS SENSIBLES	155-254
	DAÑINA A LA SALUD	255-354
	MUY DAÑINA A LA SALUD	355-604

Teniendo como base la clasificación del índice de calidad del aire PM_{10} creado por la secretaria de salud la cual estandarizo estos rangos, se procedió a definir una escala de colores para las 5 imágenes donde el color verde representa una calidad de aire optima y el color morado simboliza un valor de PM_{10} muy dañino para la salud esto de acuerdo a la clasificación presentada en la Tabla 14.

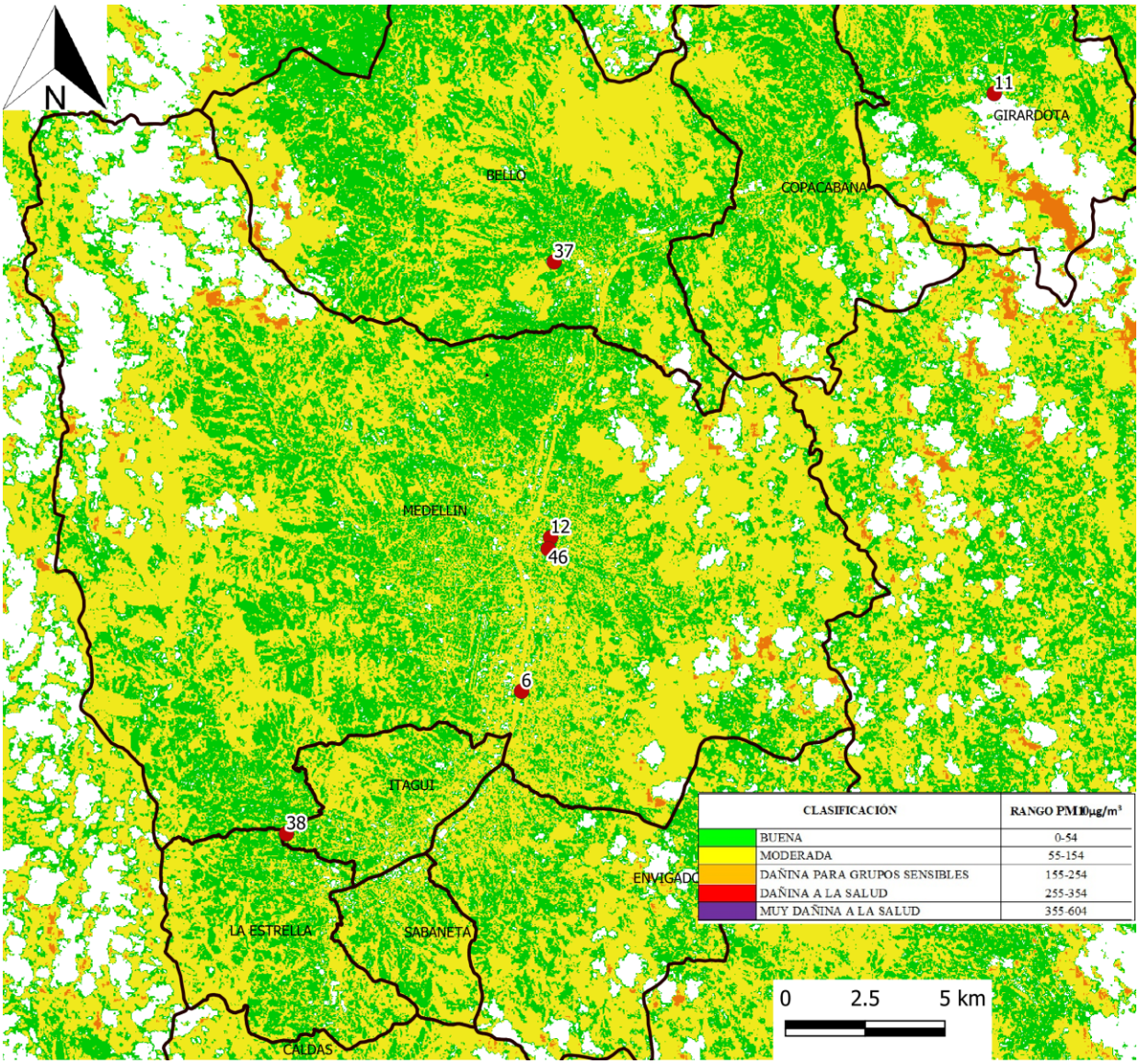


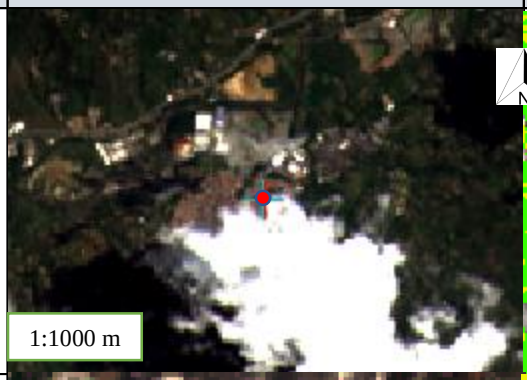
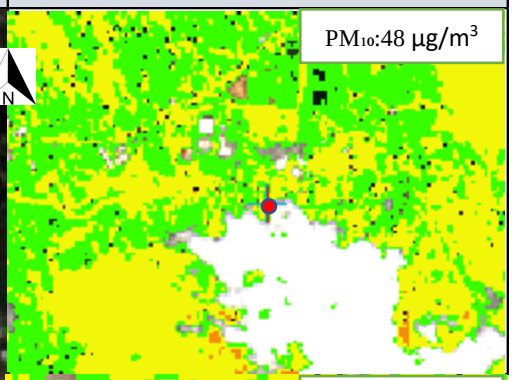
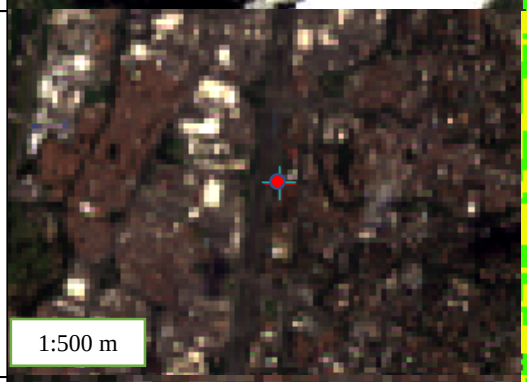
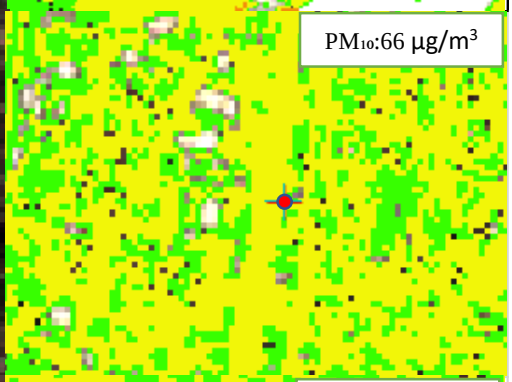
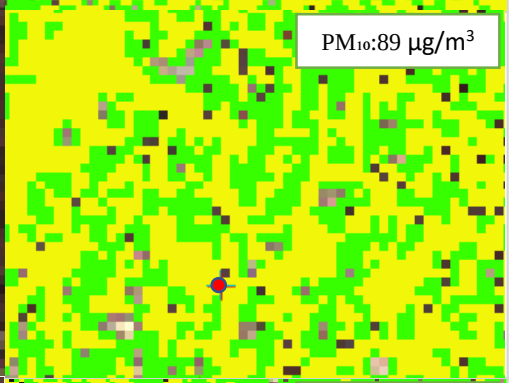
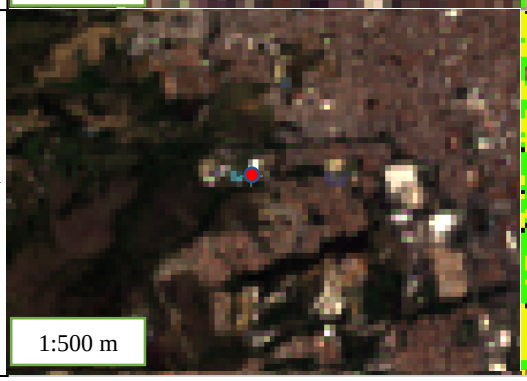
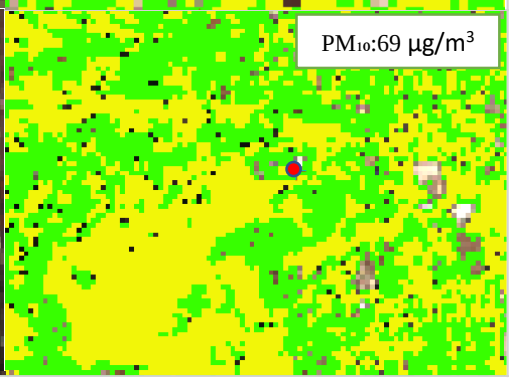
Figura 15. *Imagen 05 de mayo 2016, Clasificada por* PM_{10}

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 15 refleja la aplicación del modelo en la zona de influencia clasificada en la imagen del 5 de mayo del 2016, con la ubicación de las estaciones y los colores por medio de los cuales se evidencia el resultado de la clasificación de PM_{10} acuerdo al índice de calidad del aire, la ilustración también incluye la tabla de índice de calidad de aire de PM_{10} para que sirva como guía.

La mayor parte del Valle de Aburra para esta el 5 de mayo del 2016 sobre las 10 de la mañana contaba con una calidad de aire buena y moderada, según lo descrito en la Figura 15, las zonas color naranja son producidas por la presencia de nubes sobre la tierra lo cual distorsiona el valor real de estos espacios, se observa en algunas zonas valores estimados de PM_{10} con concentraciones negativas la mayoría como producto de algunas nubes.

Tabla 15. *Comparación zona de influencia de las estaciones, Imagen 5 de mayo 2016*

ESTACIÓN	IMAGEN REAL	IMAGEN CLASIFICADA
11. Institucion Educativa Colombia. Girardota		
6. Politecnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid		
12. Estación Tráfico Centro		
37. Universidad San Buenaventura		

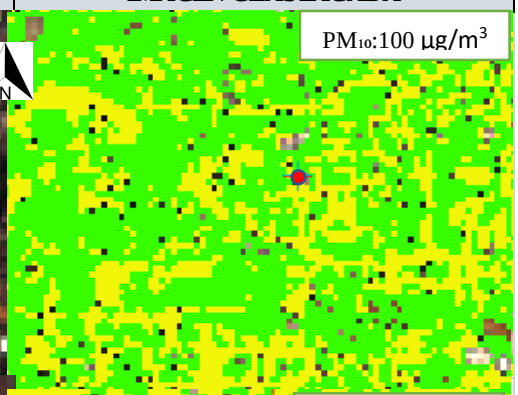
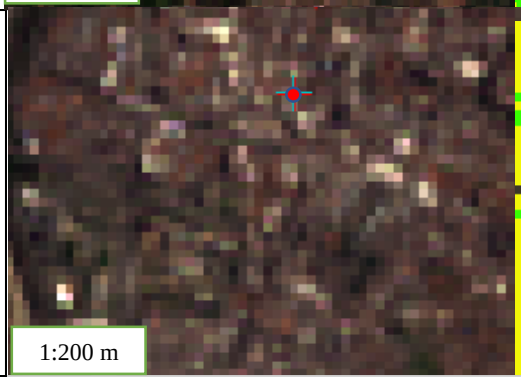
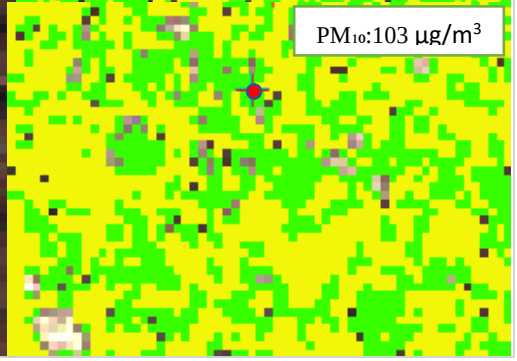
ESTACIÓN	IMAGEN REAL	IMAGEN CLASIFICADA
38. I.E. Concejo Municipal de Itagüí		
46. Exito San Antonio		

Tabla 16. *Comparación resultados PM_{10} de estación de monitoreo y modelo, 5 de mayo 2016*

Fuente: Elaboración propia

ESTACIÓN	RESULTADO PM_{10} OBSERVADO	RESULTADO PM_{10} ESTIMADO	ERROR	ERROR PROMEDIO	FECHA
11	48	NO DATO	NA	21	05/05/2016
6	66	58	8		
12	89	63	26		
37	69	50	19		
38	100	60	40		
46	103	70	33		

La Tabla 15 se presenta con el objetivo de evidenciar el área de influencia de las diferentes estaciones, comparando la imagen real con la imagen ya clasificada, con colores de acuerdo al índice de calidad de aire para PM_{10}, el dato presentado sobre el valor de PM_{10} es el observado en

las estaciones de monitoreo de calidad de aire y se presenta variación en la escala de cada zona de influencia con el objetivo de facilitar la visibilidad de las diferentes zonas, la Tabla 16 resume todo lo observado en la Tabla comparativa, se visualiza en la estación 11 una nube que no permite la obtención de los datos en esa coordenada por lo que el resultado de PM_{10} del modelo es nulo, para la estación 6 se presenta una visibilidad optima y un valor de PM_{10} estimado de 58 ($\mu g/m^3$), esta es una zona urbana, la estación está ubicada en una Universidad y teniendo en cuenta que era un jueves y que hay bastantes vías alrededor de esta se tiene un de PM_{10} clasificado como moderado en el índice de calidad del aire, para la estación 12 también está ubicada en zona urbana con alto tráfico vehicular y presenta un PM_{10} estimado de 63 ($\mu g/m^3$) clasificado como moderado según el índice de calidad de aire lo cual es lógico teniendo en cuenta la ubicación de la misma, para la estación 37 ubicada en la Universidad San Buenaventura a un extremo de la zona urbana presenta un PM_{10} moderado de acuerdo al índice de calidad del aire, a pesar de estar alejada de la densa población de la ciudad presenta altos contenidos de PM_{10} observado de 70 ($\mu g/m^3$) que aunque es moderado es un valor alto para esta zona, respecto al PM_{10} estimado el valor es de 50 ($\mu g/m^3$) que es significativamente diferente al observado, también se presenta la dificultad de que la estación está ubicada justo entre dos pixeles y uno de ellos esta sobre el techo de la Universidad por lo que el valor de PM_{10} puede resultar distorsionado, para la estación 38 y la 46 aunque están ubicadas en zonas muy diferentes de el Valle de Aburra tienen un valor de PM_{10} observado por estaciones en tierra bastante elevado causado por la cercanía de vías transitadas por vehículos, el valor de PM_{10} estimado en estas dos estaciones presenta una diferencia significativa, estos valores son los más altos ingresados para la generación de los algoritmos. El error promedio es 21.

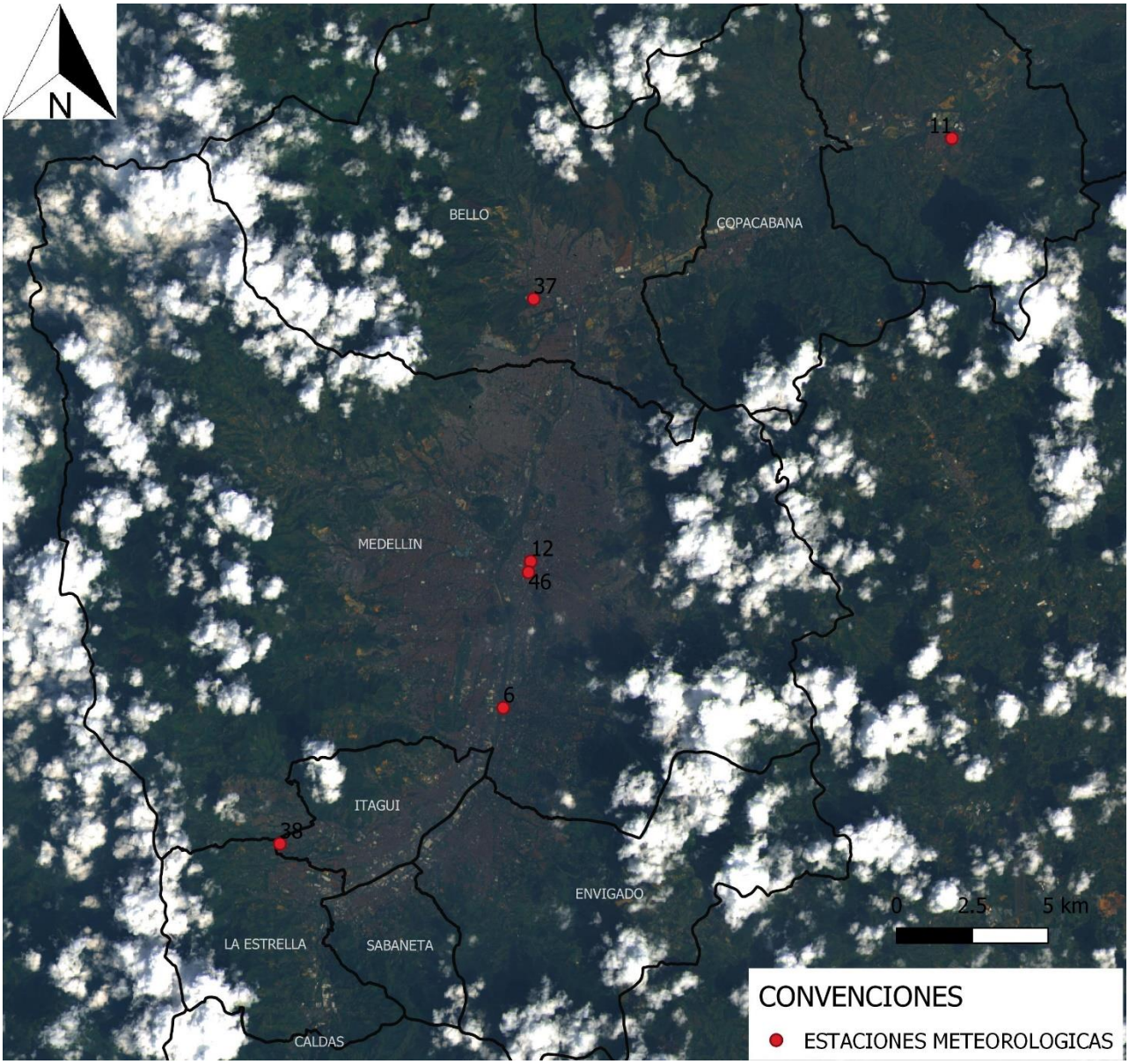


Figura 16. *Imagen 14 de enero 2016*

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 16 se presenta la visualización general de la zona de influencia para la imagen del 14 de enero del 2016, también se muestran los municipios y la ubicación de las estaciones meteorológicas y de medición de calidad del aire en tierra y el numero en las estaciones es el código de cada una de ellas.

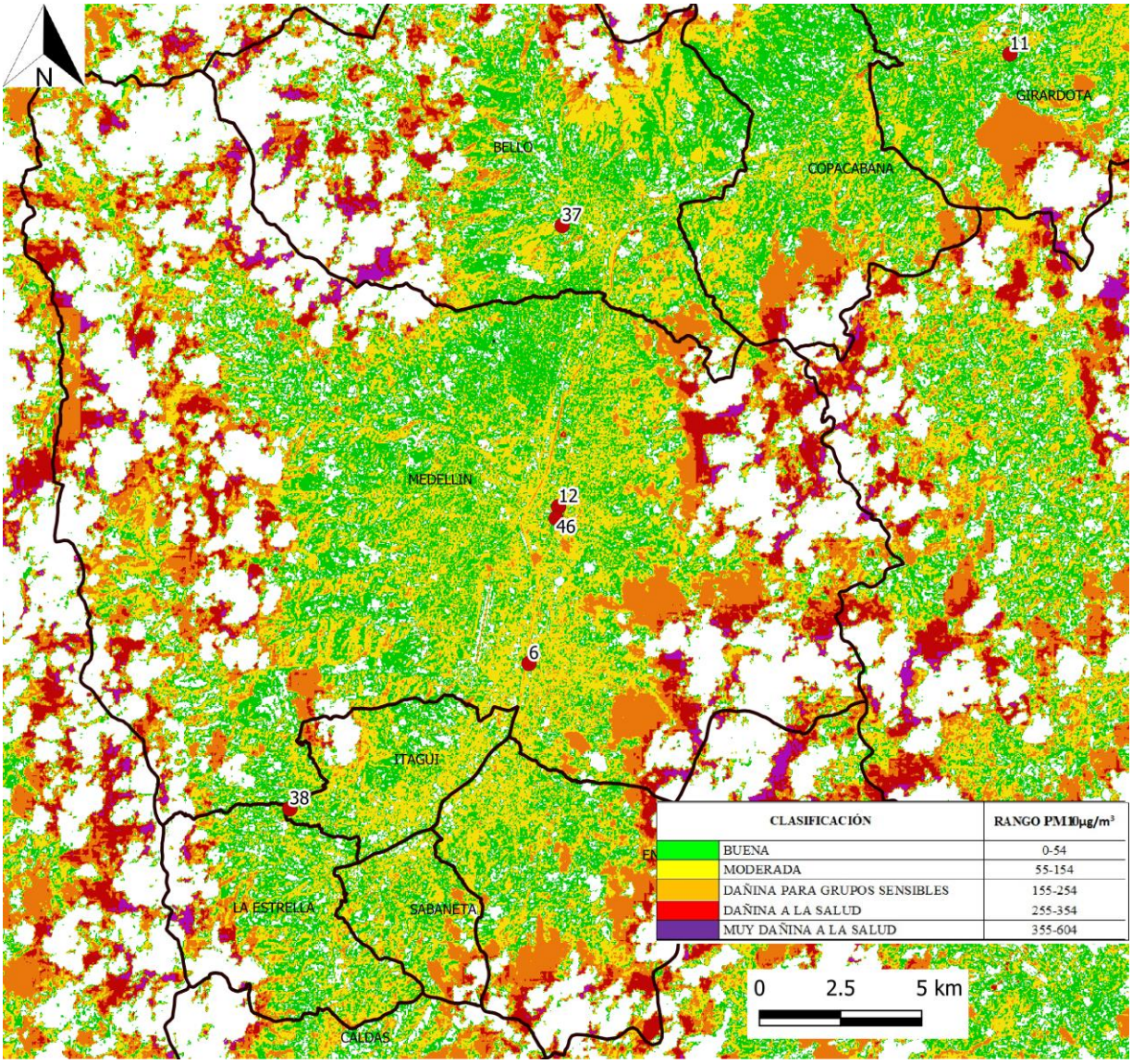


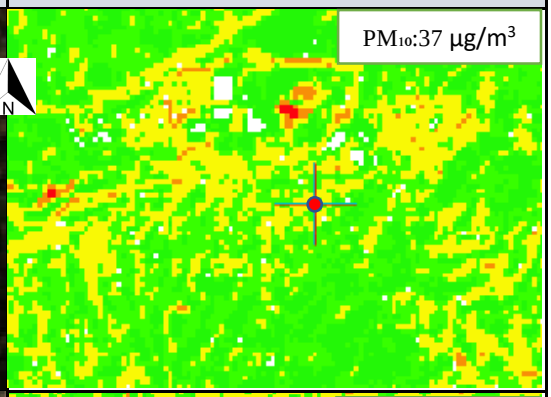
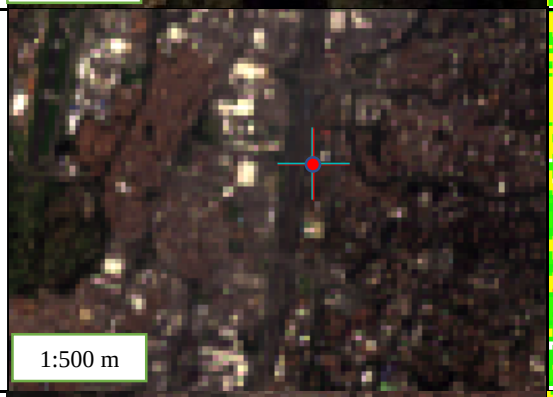
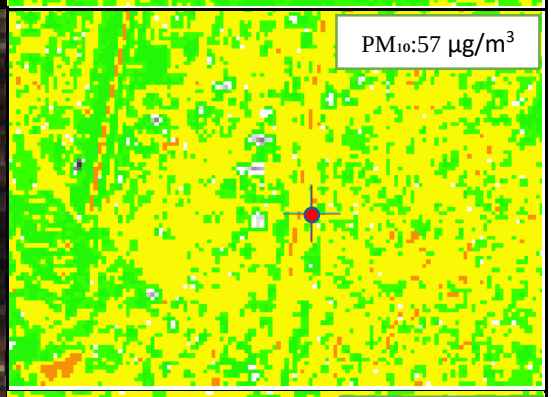
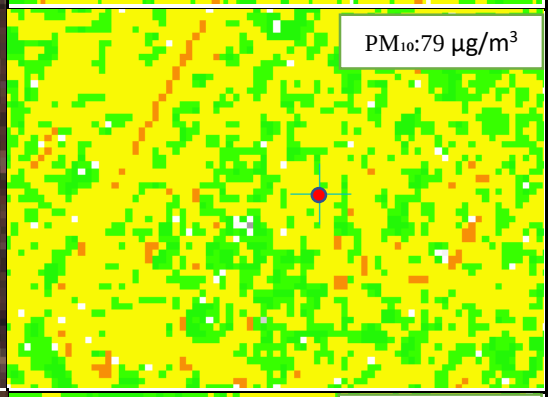
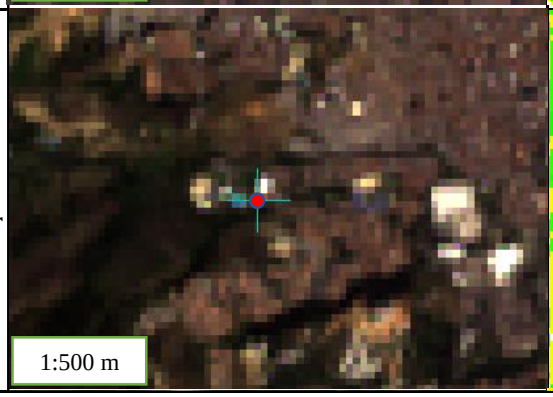
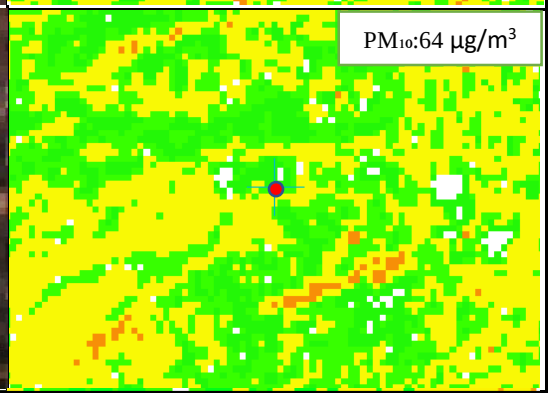
Figura 17. *Imagen 14 de enero 2016, Clasificada por* PM_{10}

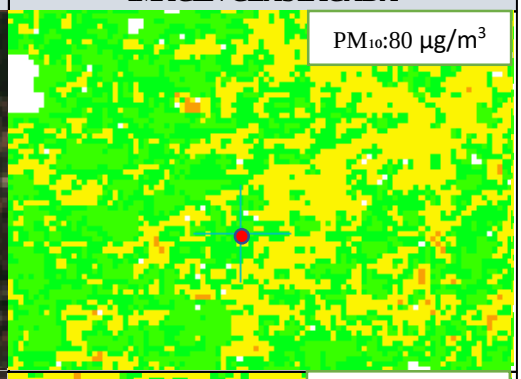
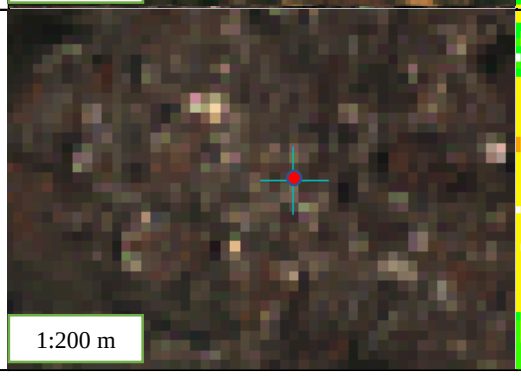
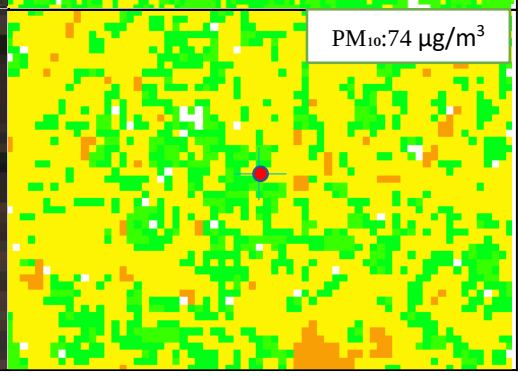
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 17 presenta la aplicación del modelo en la zona de influencia clasificada en la imagen del 14 de enero del 2016, con la ubicación de las estaciones y los colores por medio de los cuales se evidencia el resultado de la clasificación de PM_{10} acuerdo al índice de calidad del aire, esta imagen tiene poca nubosidad en el área de influencia lo que permite una mejor generación de

información de PM_{10} para las diferentes estaciones, aunque se presentan bastantes nubes en la foto en general lo cual distorsionan ciertas zonas de la imagen.

Tabla 17. *Comparación zona de influencia de las estaciones, Imagen 14 de enero 2016*

ESTACIÓN	IMAGEN REAL	IMAGEN CLASIFICADA
11. Institucion Educativa Colombia. Girardota		
6. Politecnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid		
12. Estación Tráfico Centro		
37. Universidad San Buenaventura		

ESTACIÓN	IMAGEN REAL	IMAGEN CLASIFICADA
38. I.E. Concejo Municipal de Itagüí		
46. Exito San Antonio		

A diferencia de la imagen anterior en esta imagen se evidencian zonas en naranja clasificada como "dañina para grupos sensibles", el primer mes del año en el 2016 se presentaron varias alertas por altos niveles de contaminación en el Valle de aburra, esto se debe a las dificultades que tienen las partículas contaminantes para salir del territorio por las condiciones topográficas, de montañas en los costados (Horbath, 2016).

Tabla 18. *Comparación resultados PM_{10} de estación de monitoreo y modelo, 14 de enero 2016*

Fuente: Elaboración propia

ESTACIÓN	RESULTADO PM_{10} OBSERVADO	RESULTADO PM_{10} ESTIMADO	ERROR	ERROR PROMEDIO	FECHA
11	37	35	2	10	14/01/2016
6	57	60	3		
12	79	76	3		
37	64	45	19		
38	80	59	21		
46	74	86	12		

La Tabla 17 se presenta con el objetivo de evidenciar el área de influencia de las diferentes estaciones, comparando la imagen real con la imagen ya clasificada, con colores de acuerdo al índice de calidad de aire para PM_{10}, el dato presentado sobre el valor de PM_{10} es el observado en las estaciones de monitoreo de calidad de aire y se presenta variación en la escala de cada zona de influencia con el objetivo de facilitar la visibilidad de las diferentes zonas, la Tabla 18 resume todo lo observado en la Tabla comparativa, respecto a los valores de PM_{10} en cada estación fueron muy cercanos a los valores de los modelos la mayoría de ellos clasificados como moderado, solo la estación 11 está clasificada como calidad de aire buena, esto significa que en general en el Valle de aburra se estaban presentando índices de contaminación elevados, el error promedio del modelo para esta imagen es de 10.

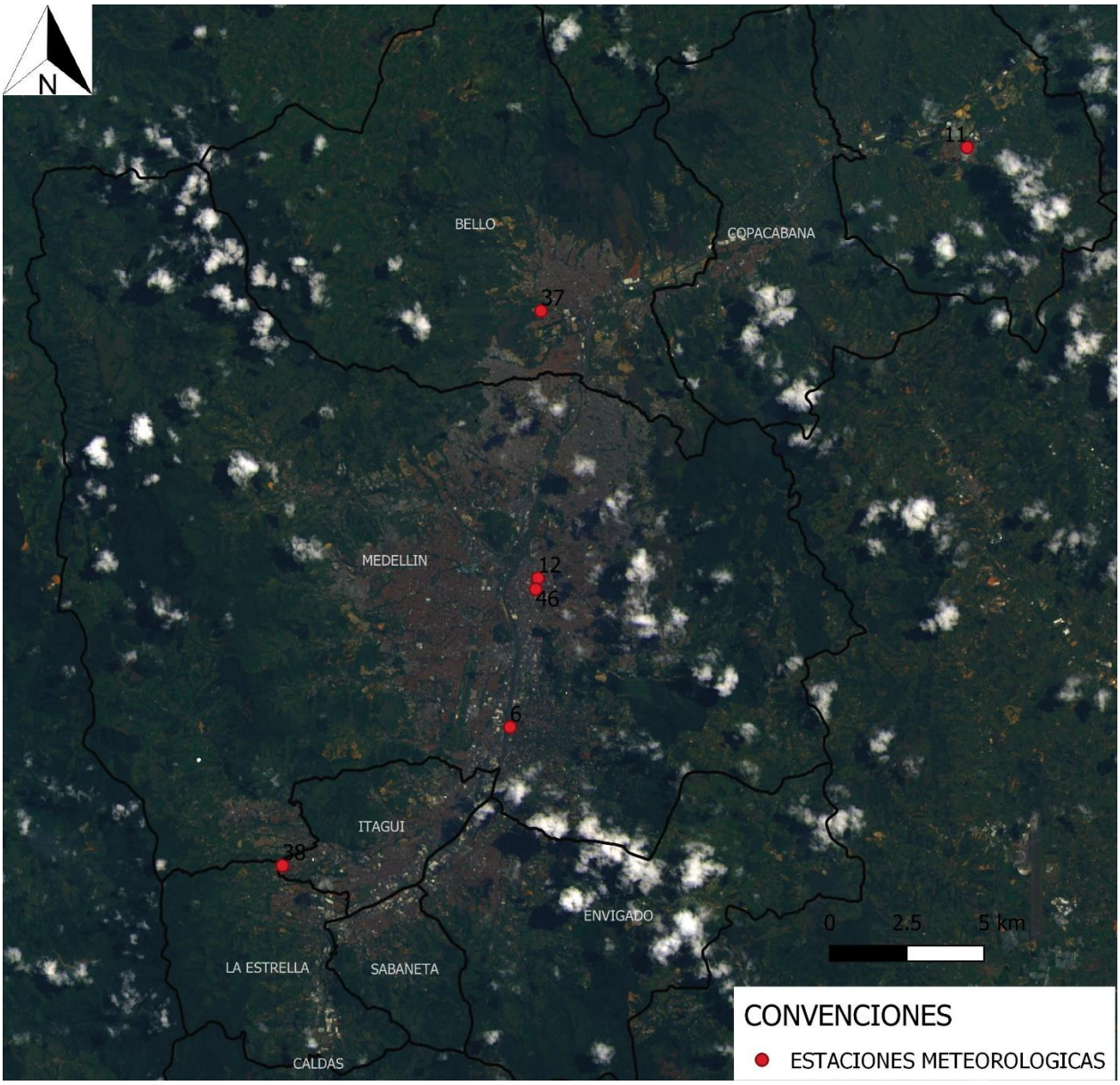


Figura 18. *Imagen 21 de mayo 2016*

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 18 se presenta la visualización general de la zona de influencia para la imagen del 21 de mayo del 2016, también se muestran los municipios y la ubicación de las estaciones meteorológicas y de medición de calidad del aire en tierra y el numero en las estaciones es el código de cada una de ellas.

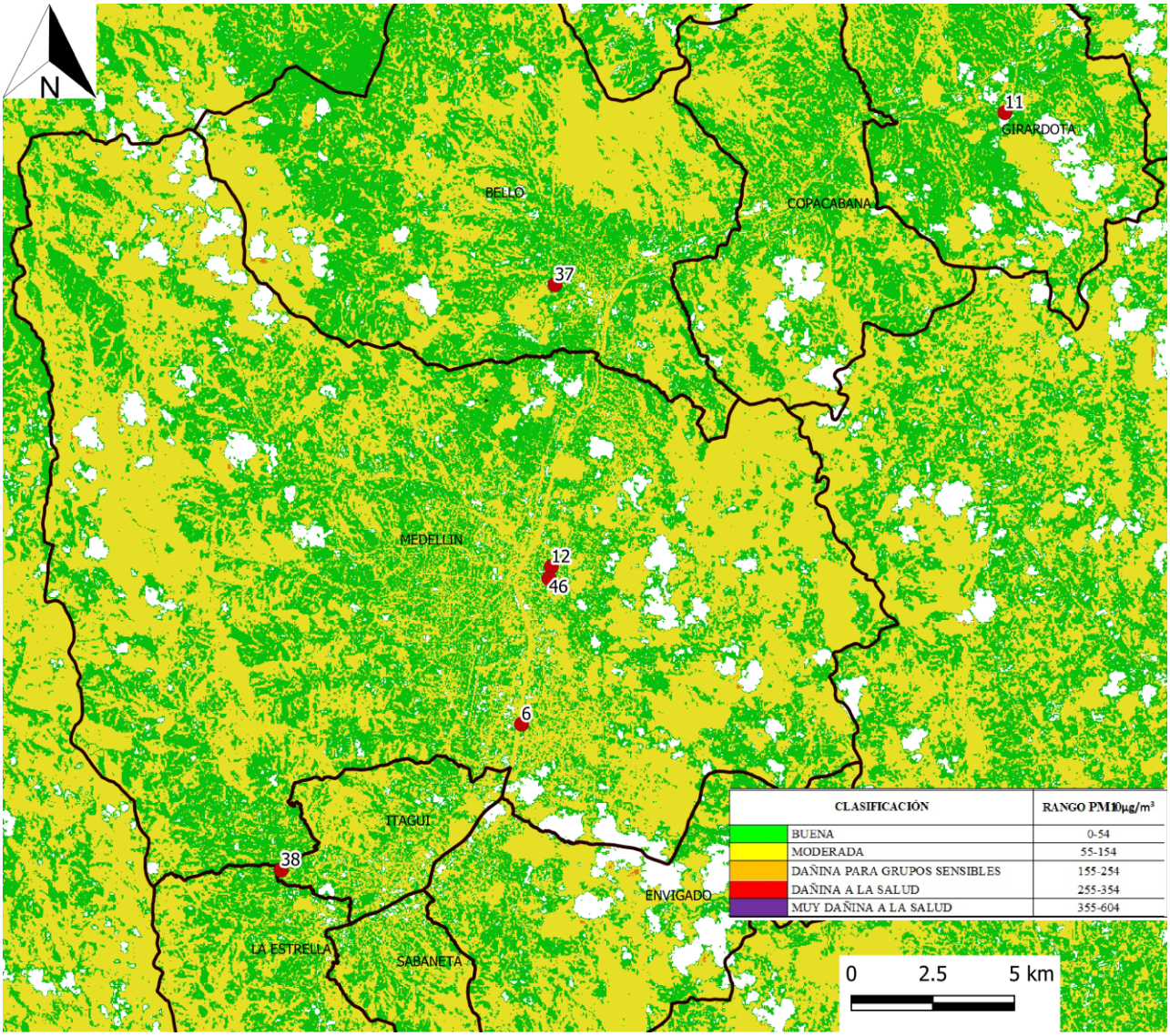
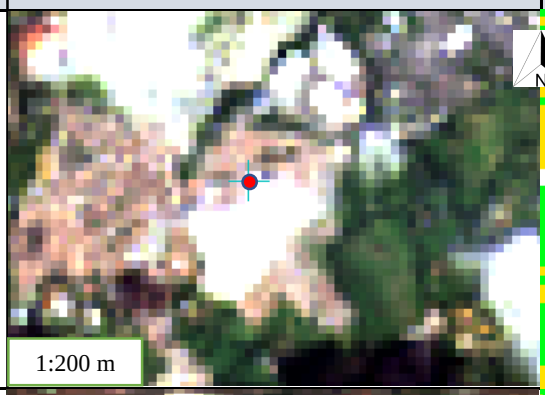
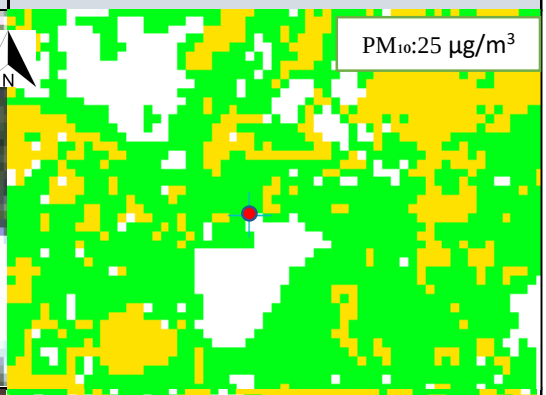
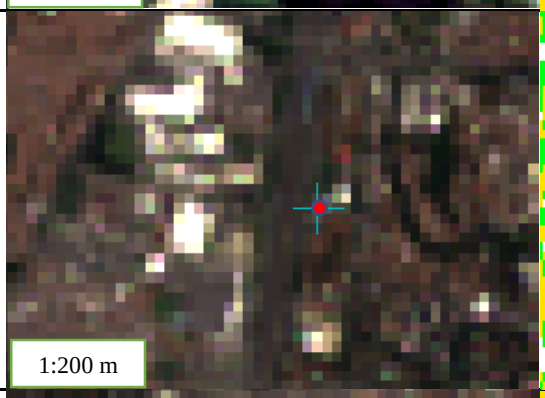
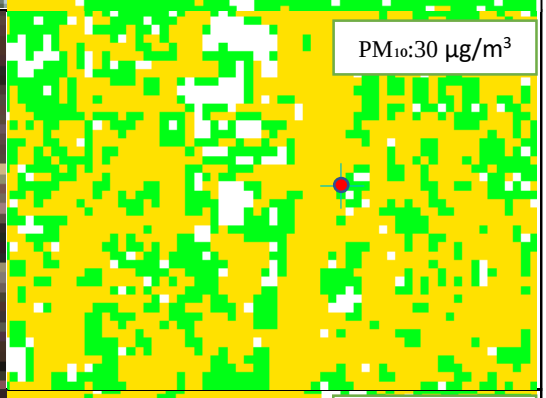
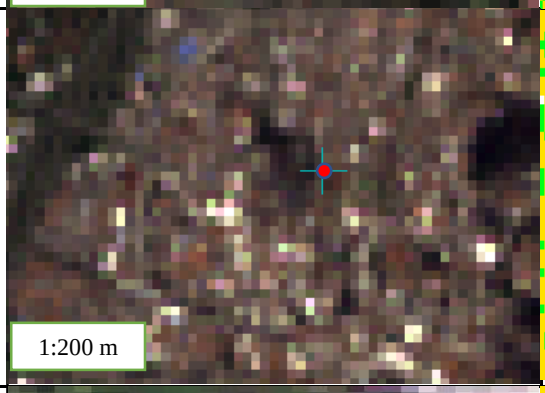
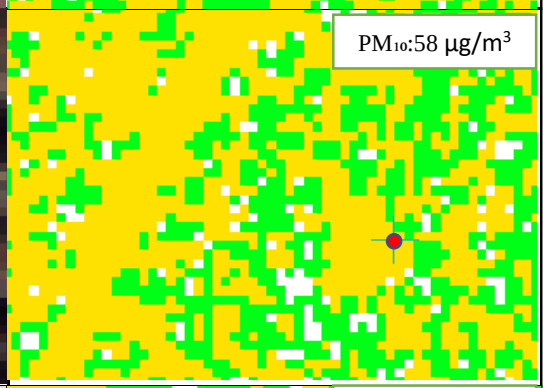
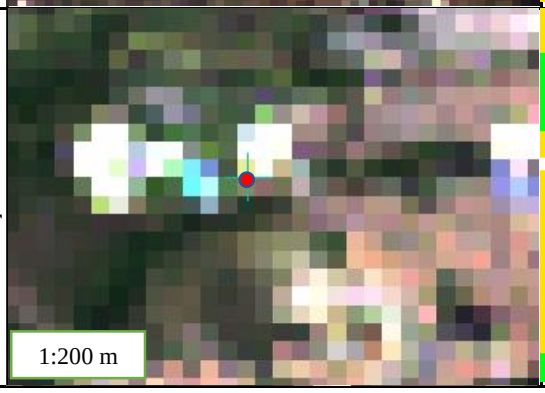
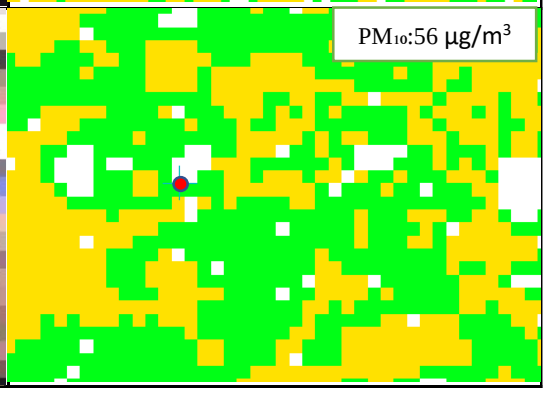


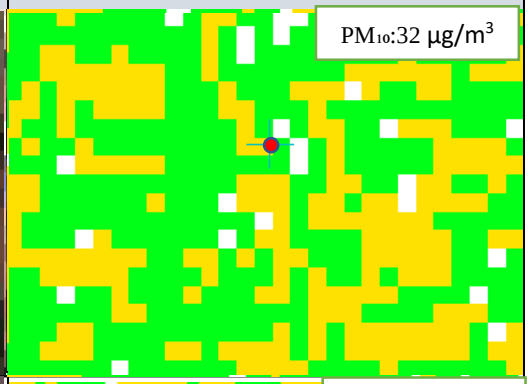
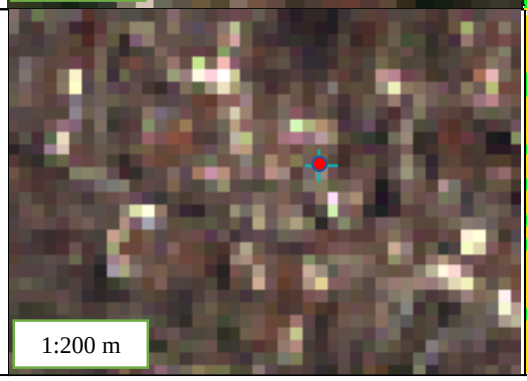
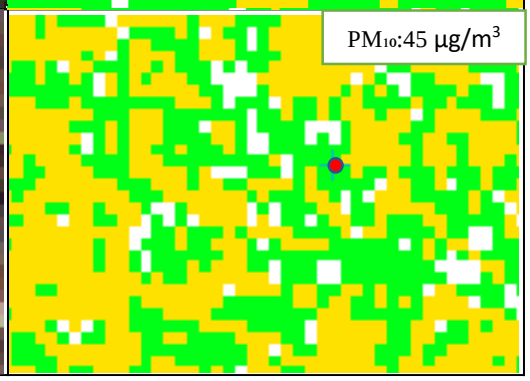
Figura 19. *Imagen 21 de mayo 2016, Clasificada por PM_{10}*

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 19 refleja la aplicación del modelo en la zona de influencia clasificada en la imagen del 21 de mayo del 2016, con la ubicación de las estaciones y los colores por medio de los cuales se evidencia el resultado de la clasificación de PM_{10} acuerdo al índice de calidad del aire, la ilustración también incluye la tabla de índice de calidad de aire de PM_{10} para que sirva como guía.

__Tabla 19__. Comparación zona de influencia de las estaciones, Imagen 21 de mayo 2016

ESTACIÓN	IMAGEN REAL	IMAGEN CLASIFICADA
11. Institucion Educativa Colombia. Girardota		
6. Politecnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid		
12. Estación Tráfico Centro		
37. Universidad San Buenaventura		

ESTACIÓN	IMAGEN REAL	IMAGEN CLASIFICADA
38. I.E. Concejo Municipal de Itagüí		
46. Exito San Antonio		

En la Tabla 19 se observa en cada una de las estaciones la presencia de nubes lo cual distorsiona la visualización de la imagen clasificada y dificulta el análisis de la misma, también se pueden identificar pixeles blancos sin aparente causa esto se debe a valores negativos producto del modelo aplicado en la imagen.

Tabla 20. *Comparación resultados PM_{10} de estación de monitoreo y modelo, 21 de mayo 2016*

Fuente: Elaboración propia

ESTACIÓN	RESULTADO PM_{10} OBSERVADO	RESULTADO PM_{10} ESTIMADO	ERROR	ERROR PROMEDIO	FECHA
11	25	NO DATO	NA	23,5	21/05/2016
6	30	63	33		
12	58	78	20		
37	56	NO DATO	NA		
38	32	60	28		
46	45	58	13		

La Tabla 19 se presenta con el objetivo de evidenciar el área de influencia de las diferentes estaciones, comparando la imagen real con la imagen ya clasificada, con colores de acuerdo al índice de calidad de aire para PM_{10}, el dato presentado sobre el valor de PM_{10} es el observado en las estaciones de monitoreo de calidad de aire y se muestra variación en la escala de cada zona de influencia con el objetivo de facilitar la visibilidad de las diferentes zonas, la Tabla 20 resume todo lo observado en la Tabla 19 comparativa; Respecto a los valores de PM_{10} observado en las estaciones de monitoreo y el PM_{10} estimado por el modelo en esta imagen las diferencias son las más altas de todas las imágenes, para las estaciones 11 y 37 se presentaron valores negativos en el PM_{10} estimado productos de nubes en estas zonas las cuales no permiten un dato confiable de PM_{10}; el modelo no se ajusta a la imagen y solo en 2 estaciones (12 y 46) el PM_{10} observado y el PM_{10} estimado están dentro de la misma clasificación del índice de calidad del aire, el error promedio es de 23.5, el más alto de todas las imágenes.

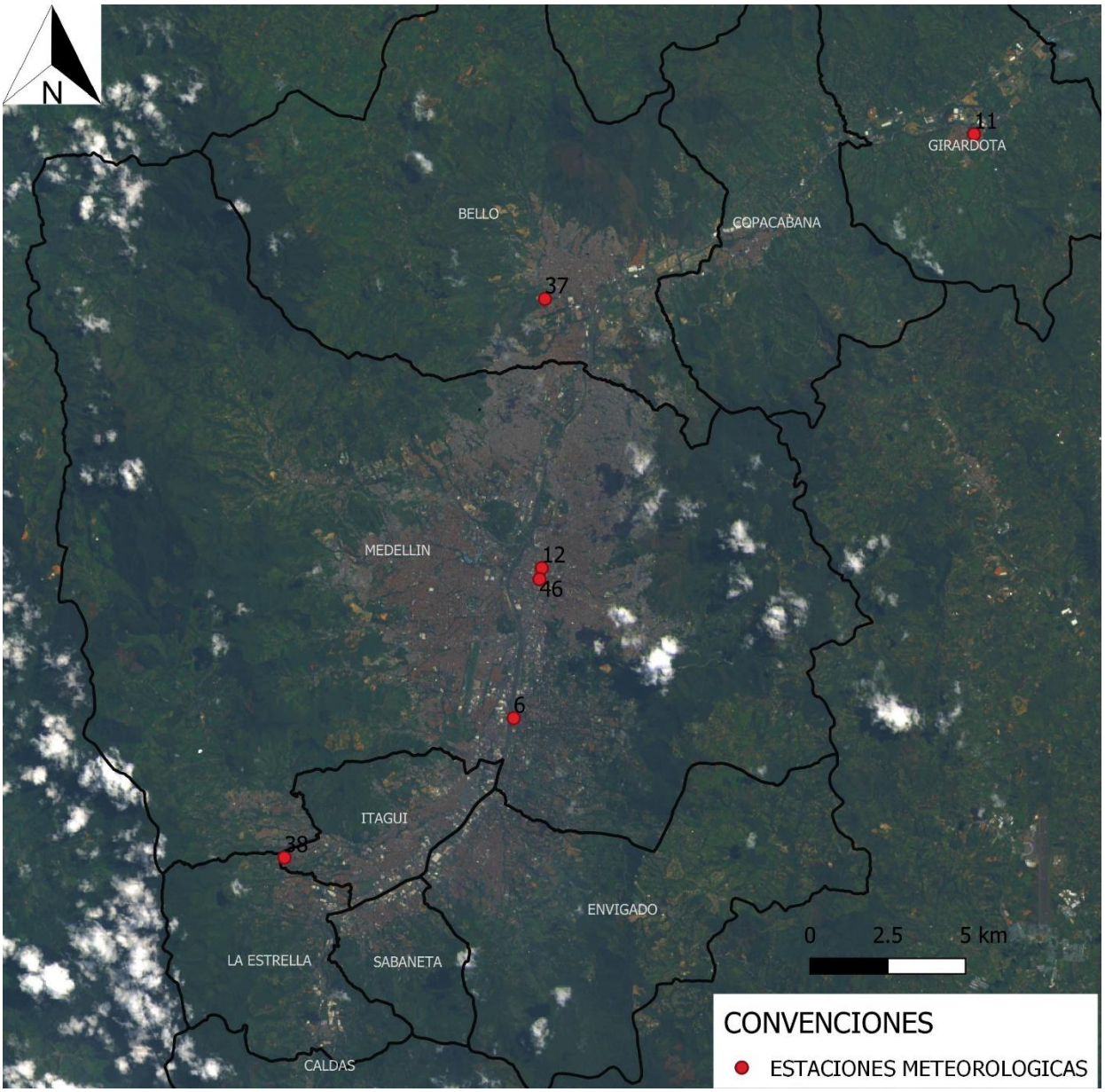


Figura 20. *Imagen 22 de junio 2016*

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 20 se presenta la visualización general de la zona de influencia para la imagen del 5 de mayo del 2016, también se muestran los municipios y la ubicación de las estaciones meteorológicas y de medición de calidad del aire en tierra y el número en las estaciones es el código de cada una de ellas.

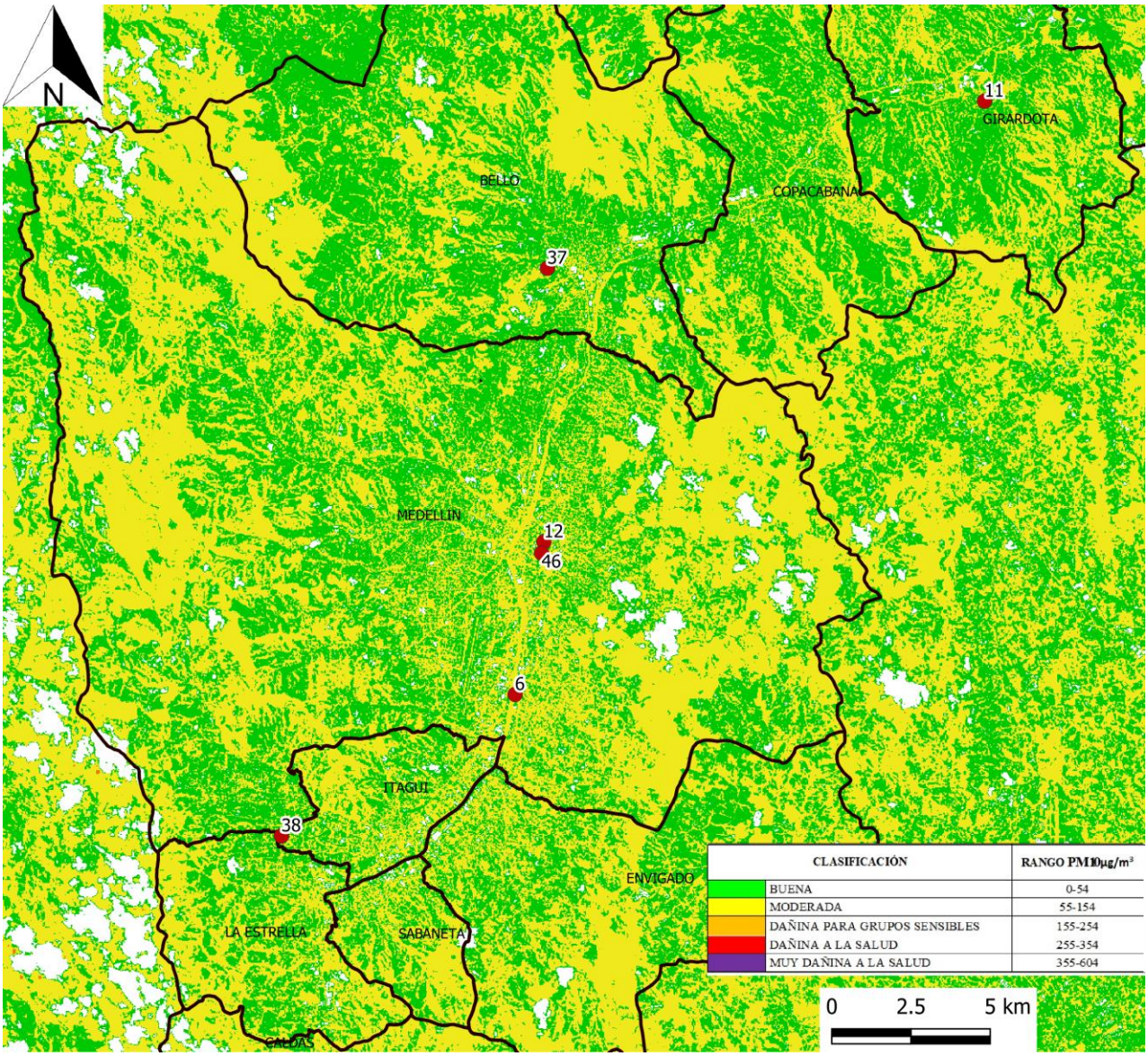


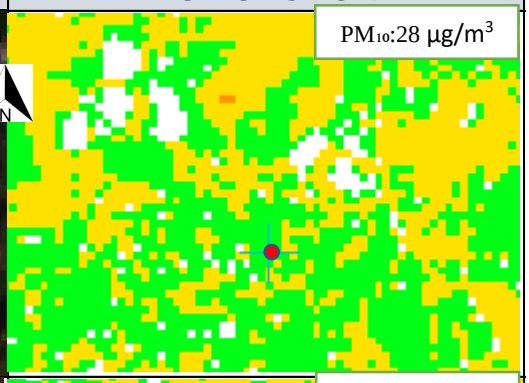
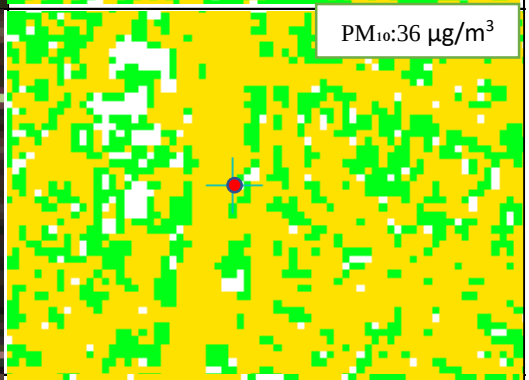
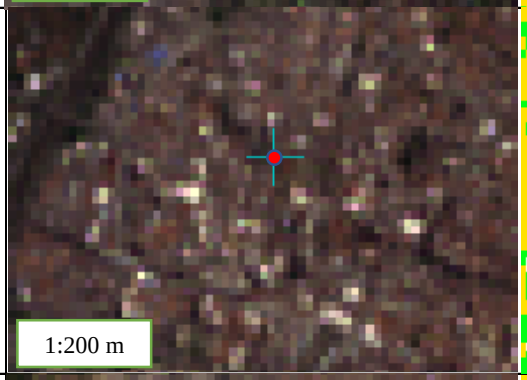
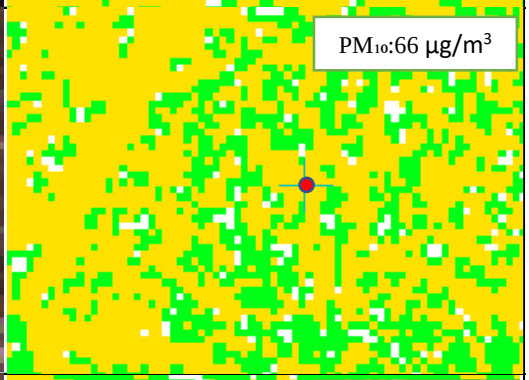
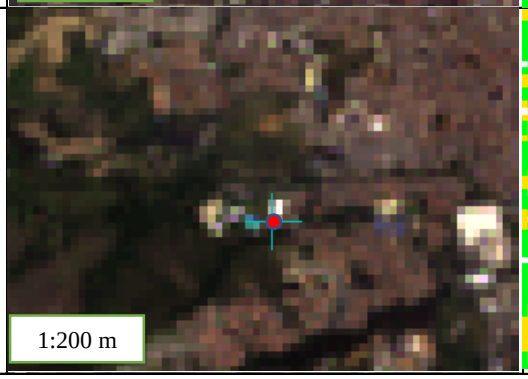
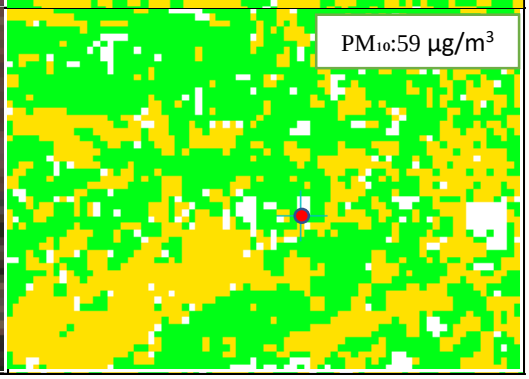
Figura 21. *Imagen 22 de junio 2016, Clasificada por PM_{10}*

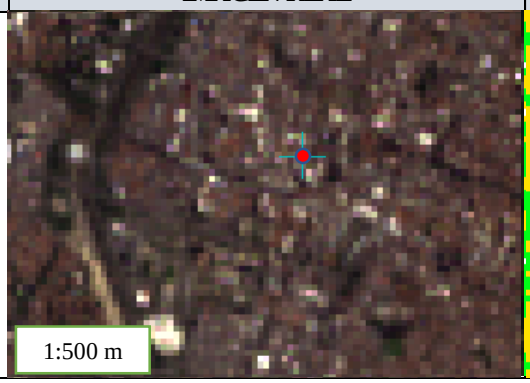
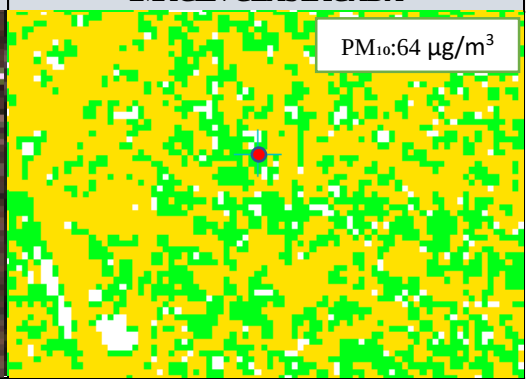
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 21 refleja la aplicación del modelo en la zona de influencia clasificada en la imagen del 22 de junio del 2016, con la ubicación de las estaciones y los colores por medio de los cuales se evidencia el resultado de la clasificación de PM_{10} de acuerdo al índice de calidad del aire, la

ilustración también incluye la tabla de índice de calidad de aire de PM_{10}, en esta imagen se presentan algunas nubes, pero en general la zona de influencia del Valle de aburra está despejado.

Tabla 21. *Comparación zona de influencia de las estaciones, Imagen 22 de junio 2016*

ESTACIÓN	IMAGEN REAL	IMAGEN CLASIFICADA
11. Institucion Educativa Colombia. Girardota		
6. Politecnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid		
12. Estación Tráfico Centro		
37. Universidad San Buenaventura		

ESTACIÓN	IMAGEN REAL	IMAGEN CLASIFICADA
46. Exito San Antonio		

La Tabla 21 se presenta con el objetivo de evidenciar el área de influencia de las diferentes estaciones, comparando la imagen real con la imagen ya clasificada, con colores de acuerdo al índice de calidad de aire para PM_{10}, el dato presentado sobre el valor de PM_{10} es el observado en las estaciones de monitoreo de calidad de aire y se presenta variación en la escala de cada zona de influencia con el objetivo de facilitar la visibilidad de las diferentes zonas.

Tabla 22. *Comparación resultados PM_{10} de estación de monitoreo y modelo, 22 de junio 2016*

Fuente: Elaboración propia

ESTACIÓN	RESULTADO PM_{10} OBSERVADO	RESULTADO PM_{10} ESTIMADO	ERROR	ERROR PROMEDIO	FECHA
11	28	36	8	13,5	22/06/2016
6	36	54	18		
12	66	68	2		
37	59	NO DATO	NA		
46	64	38	26		

La Tabla 22 resume todo lo observado en la Tabla 21, en las 2 tablas se evidencia las diferentes estaciones y sus respectivas zonas de influencia, se obtuvieron datos de PM_{10} bueno y moderado de acuerdo al índice de calidad de aire, en la estación 11 Institución educativa Colombia se muestra un índice de calidad de aire bueno en las zonas donde hay vegetación lo cual es coherente, pero en

la estación Universidad San buenaventura el efecto es contrario ya que en la zona donde se presenta vegetación la calidad del aire está clasificada como moderada.

Respecto a los valores de PM_{10} de cada estación comparados con el PM_{10} del modelo es bastante cercano, en la estación 11 el PM_{10} observado es de 28 y el PM_{10} estimado es 36, en la estación 6 el PM_{10} observado es de 36 y el PM_{10} estimado es 54 y en la estación 12 el PM_{10} observado es de 66 y el PM_{10} estimado es 68, la estación 37 presenta valores negativos probablemente debido al techo de la universidad y a la ubicación de la estación en medio de 2 píxeles, finalmente la estación 46 presenta un PM_{10} observado es de 64 y el PM_{10} estimado es 38, el error promedio de 13.5.

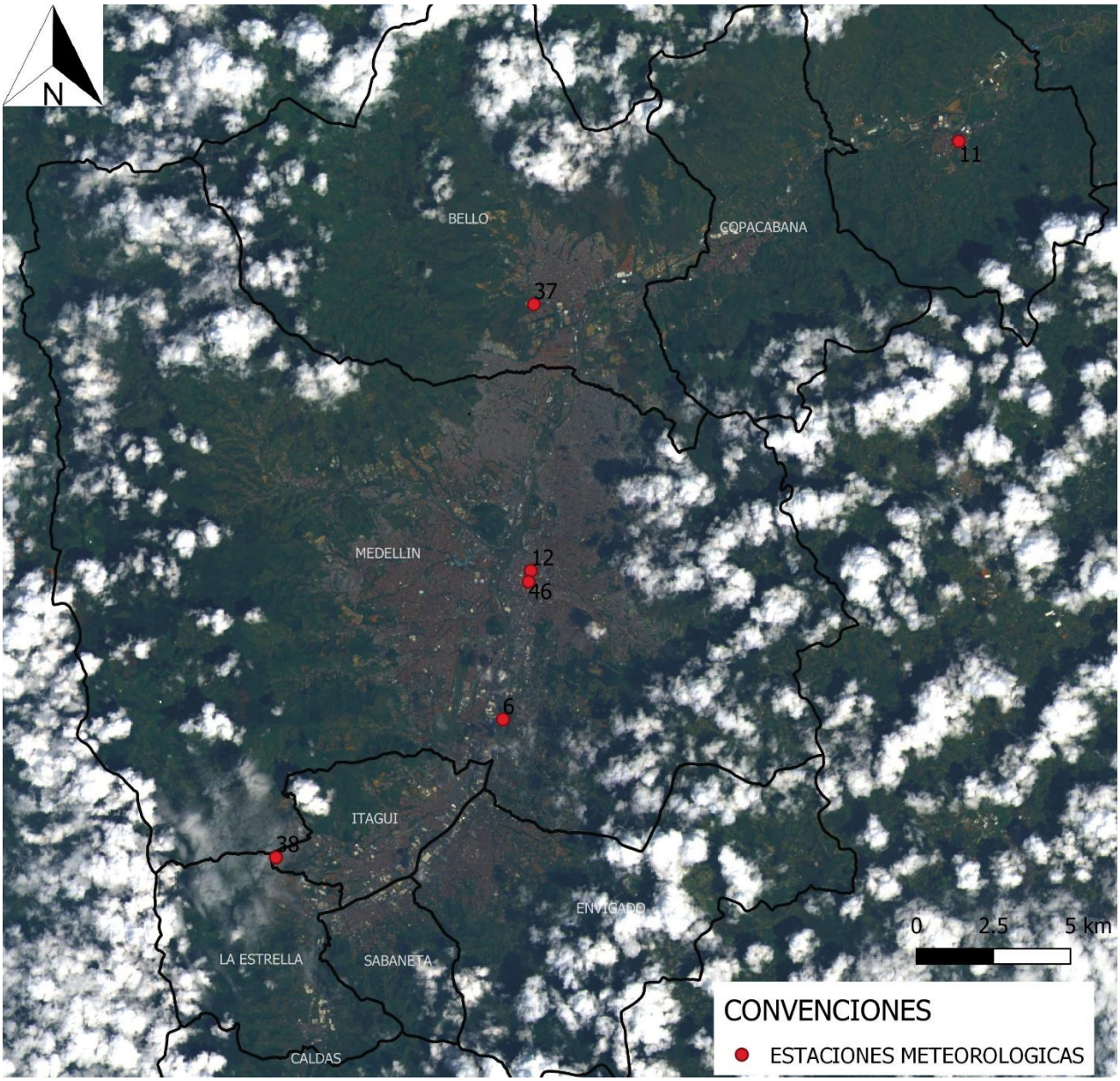


Figura 22. *Imagen 28 de octubre 2016*

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 22 se presenta la visualización general de la zona de influencia para la imagen del 28 de octubre del 2016, también se muestran los municipios y la ubicación de las estaciones meteorológicas y de medición de calidad del aire en tierra y el numero en las estaciones es el código de cada una de ellas.

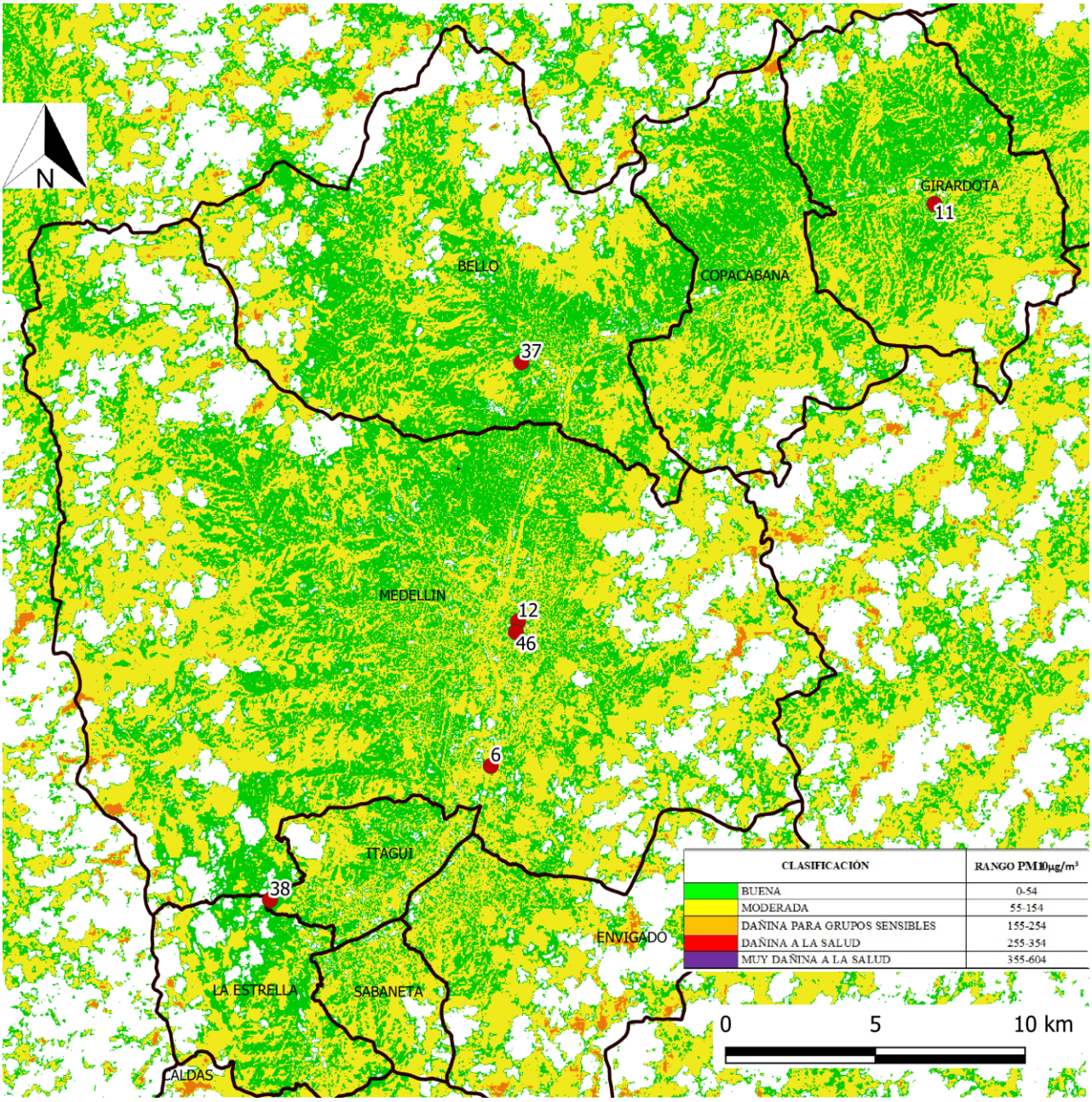
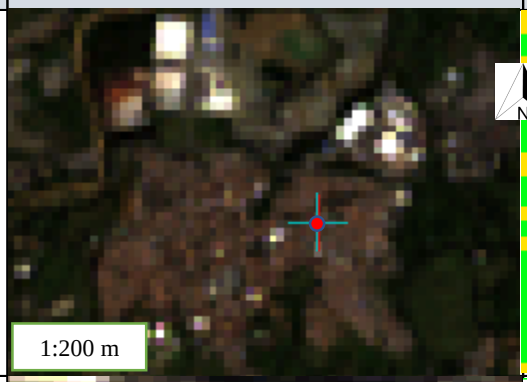
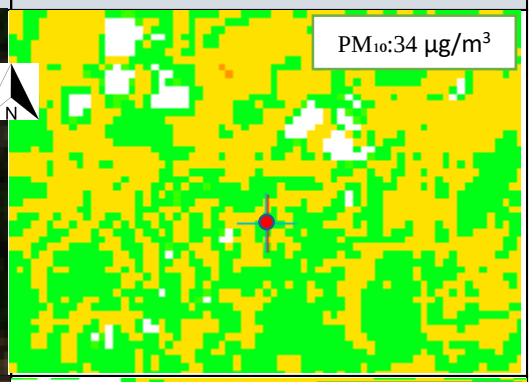
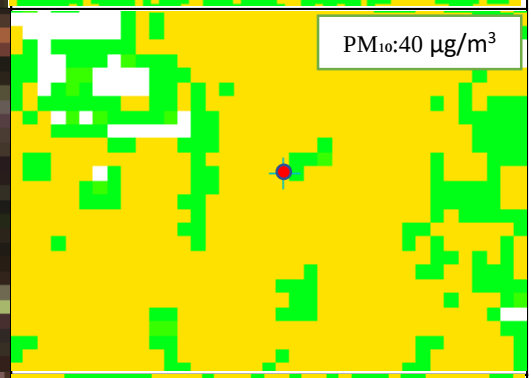
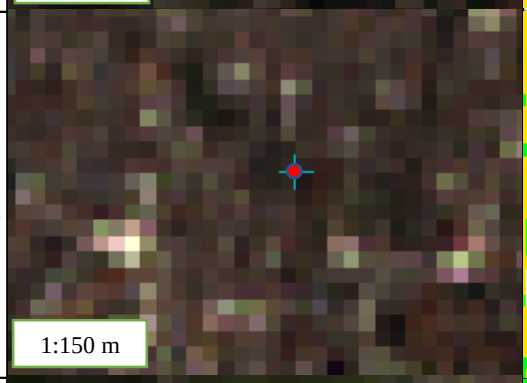
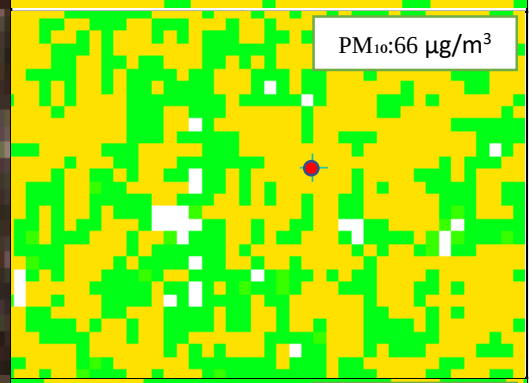
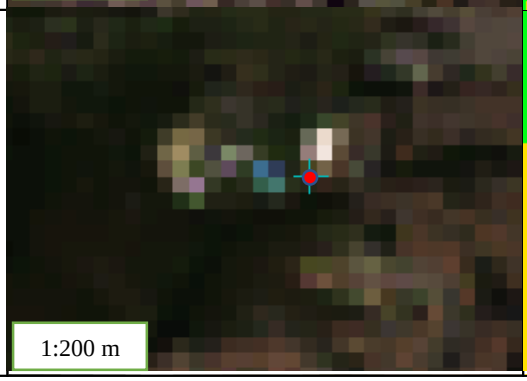
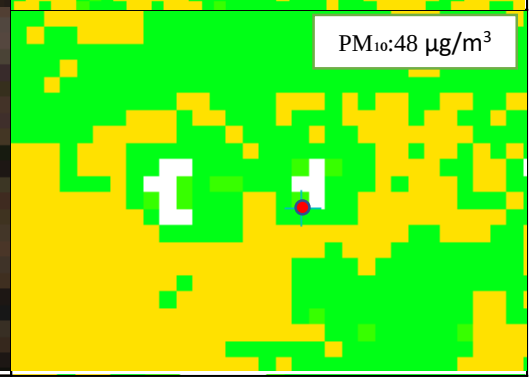


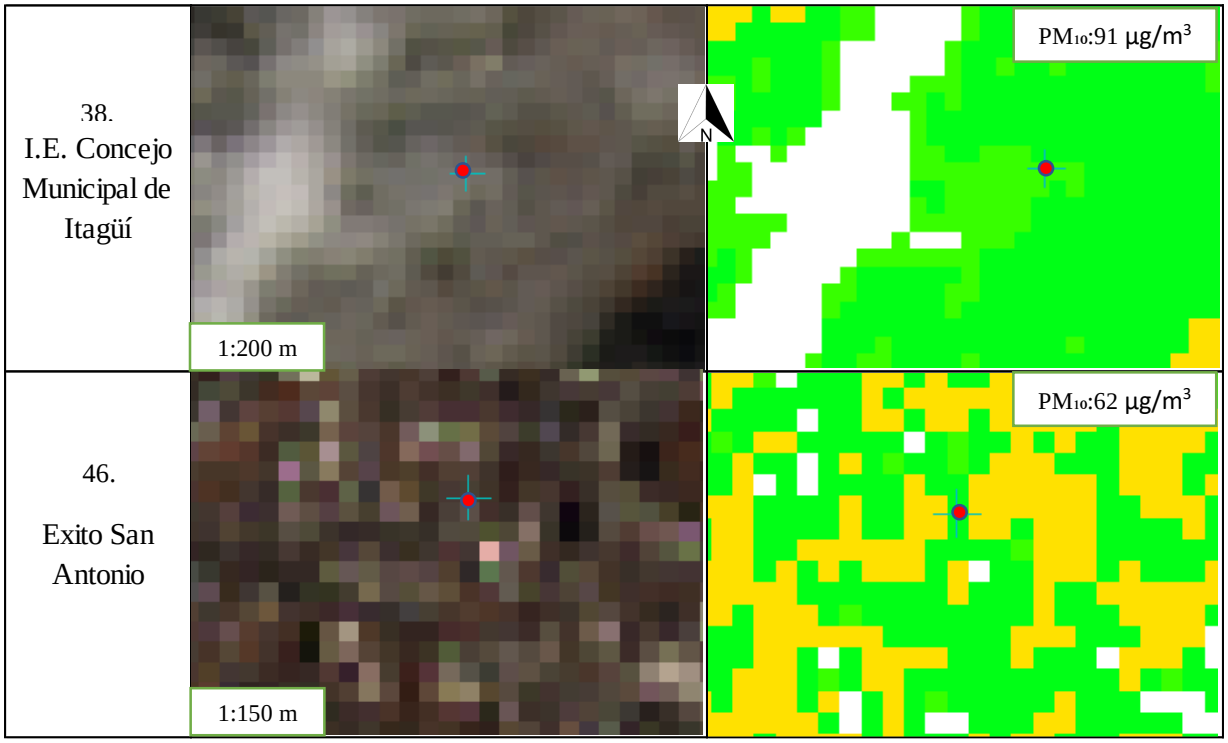
Figura 23. *Imagen 28 de octubre 2016, Clasificada por* PM_{10}

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 23 refleja la aplicación del modelo en la zona de influencia clasificada en la imagen del 28 de octubre del 2016, con la ubicación de las estaciones y los colores por medio de los cuales se evidencia el resultado de la clasificación de PM_{10} de acuerdo al índice de calidad del aire, la ilustración también incluye la tabla de índice de calidad de aire de PM_{10}.

***Tabla 23**. Comparación zona de influencia de las estaciones, Imagen 28 de octubre 2016*

ESTACIÓN	IMAGEN REAL	IMAGEN CLASIFICADA
11. Institucion Educativa Colombia. Girardota		
6. Politecnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid		
12. Estación Tráfico Centro		
37. Universidad San Buenaventura		



La Tabla 23 se presenta con el objetivo de evidenciar el área de influencia de las diferentes estaciones, comparando la imagen real con la imagen ya clasificada, con colores de acuerdo al índice de calidad de aire para PM_{10}, el dato presentado sobre el valor de PM_{10} es el observado en las estaciones de monitoreo de calidad de aire y se presenta variación en la escala de cada zona de influencia con el objetivo de facilitar la visibilidad de las diferentes zonas.

Tabla 24. *Comparación resultados PM_{10} de estación de monitoreo y modelo, 28 de octubre 2016*

Fuente: Elaboración propia

ESTACIÓN	RESULTADO PM_{10} OBSERVADO	RESULTADO PM_{10} ESTIMADO	ERROR	ERROR PROMEDIO	FECHA
11	34	37	4	8,3	28/10/2016
6	40	58	18		
12	66	73	7		
37	48	NO DATO	NA		
38	91	80	11		
46	62	52	10		

La Tabla 24 resume todo lo observado en la Tabla 23, de estas dos tablas se puede analizar que las zonas de influencia de cada una de las estaciones muestran valores coherentes con los valores de PM_{10} de las estaciones, es el caso de la estación 11 con un PM_{10} observado de 34 y un PM_{10} estimado de 37, la estación 6 con un PM_{10} observado de 40 y un PM_{10} estimado de 58, la estación 12 con un PM_{10} observado de 66 y un PM_{10} estimado de 73, y la estación 46 con un PM_{10} observado de 62 y un PM_{10} estimado de 52, la estación 38 Consejo municipal de Itagüí tiene una nube que interfiere en la obtención del valor de PM_{10} del modelo, así mismo el área de influencia de esta estación tampoco tendrá valores acordes porque la nube cubre prácticamente toda la zona.

Para esta fecha la zona de influencia del Valle de Aburra presenta varias nubes las cuales producen valores negativos en los ND de la imagen clasificada, y la sombra de estas nubes producen distorsión y generan el color naranja en la imagen.

De acuerdo a los datos de PM_{10} de la estación de calidad de aire y el PM_{10} del modelo la diferencia entre estos datos es baja, la estación 37 presenta un PM_{10} negativo esto fue algo que se presentó para esa estación en la mayoría de imágenes por lo que se puede suponer que los valores de PM_{10} son vulnerables a los elementos que estén en el mismo pixel o cerca, el error promedio de 8.33.

El mejor modelo se obtuvo con 4 bandas 1, 2, 4 y 5 (aerosol, azul, rojo e infrarrojo) con un R^2 de 0.96 y un RMSE de 3.76 lo cual indica buena correlación entre estas bandas y el PM_{10} obtenido de las estaciones de calidad de aire, pero se evidencia que mejoraría con más imágenes y más

estaciones ya que probablemente las imágenes se ajustaron con los valores de PM_{10} de las estaciones, las zonas que presentan mayor contaminación de PM_{10} son San Antonio en Medellín y la parte centro de Itagüí, una de las razones es que son centros poblados con un gran número de habitantes.

Las regresiones realizadas con las 5 bandas a pesar que para cada imagen han arrojado modelos óptimos, funcionan exclusivamente para la imagen para la que se realizó y al momento de validarlo en otra imagen arrojan datos resultantes con errores amplios, esto se debe a que el modelo se ajusta específicamente para los datos de las 5 bandas de la imagen que se esté trabajando, por lo que entre más información de estaciones en tierra se tenga, más adecuado va a resultar el modelo.

La nubosidad en las imágenes que se presenta generalmente sobre el ecuador es un factor que dificulta tener la información necesaria e imágenes adecuadas para trabajar, en posteriores investigaciones se podría trabajar en mitigar el efecto de estas sobre los modelos.

El hecho de que las estaciones tengan dato de PM_{10} cada hora permite que se use el dato más cercano a la hora en que se tomó la imagen y produjo que se trabajara con información ideal para desarrollar los objetivos, esto es una gran ventaja para el presente estudio en comparación con los estudios existentes.

12. Conclusiones

- Por medio del uso de imágenes satelitales Landsat 8 fue posible realizar un análisis de la contaminación en el Valle de Aburra de forma global (continua) y no puntual (discreta), se evaluaron 5 imágenes de diferentes fechas con poca nubosidad en la zona de estudio, se obtuvo el modelo PM_{10} = 0.03842 B1 + (-0.11570) B2 + 0.37494 B4 + 0.51117 B5 + 62.52949 con el cual arrojo un coeficiente de determinación de 0.96 y un error cuadrático medio de 2.87, por medio de este modelo fue posible graficar la concentración de material particulado PM_{10} en las 5 imágenes.

- Se estableció una metodología para medir la cantidad de material particulado PM_{10} en el Valle de Aburrá, Antioquia para el año 2016 a partir de la calibración de imágenes satelitales Landsat 8 tomando como base los valores de PM_{10} de las estaciones en tierra.

- Se validó la metodología mediante el análisis de resultados y la comparación entre los datos obtenidos y los datos de PM_{10} tomados de las estaciones de monitoreo de calidad de aire ubicadas en el Valle de Aburra, generando imágenes de clasificación de PM_{10}.

- Se evaluó la relación entre el PM_{10} obtenido de mediciones en estaciones de monitoreo de calidad de aire y los datos de reflectancia de las bandas multiespectrales de Landsat 8 a través de métodos estadísticos de regresión multivariante obteniendo

Recomendaciones

- El uso de una mayor cantidad de imágenes con las mismas características podría mejorar significativamente el modelo, ya que en este caso las imágenes con las que se pudo llevar a cabo el trabajo fueron pocas.

- Se recomienda el uso de imágenes con mayor resolución temporal, ya que esto permitiría que se tuviera datos con mayor frecuencia, aunque no se puede dejar de lado la resolución espacial que fue prioridad en la presente investigación.

- A pesar de que la red de monitoreo de calidad del aire en el Valle de Aburrá cuenta con un gran número de estaciones son muy pocas las que tienen datos de PM_{10} cada hora, con más estaciones se podría ejercer mayor control.

Bibliografía

Abad Crespo, L. C. (2016). *Estimación de la concentración de material particulado menor a 10 micras a través de sensores remotos en el área urbana de la ciudad de Cuenca*. Universidad de Cuenca.

Alias, M., Hamzah, Z., & Kenn, L. S. (2007). PM10 and Total suspended particulates (TSP) measurements in various power stations. *The Malaysian Journal of Analytical Sciences*, *11*(1), 255–261.

Álvarez Mendoza, C. I. (2014). Estimación de contaminación del aire por PM10 en Quito determinado por índices ambientales obtenidos con imágenes satelitales Landsat ETM+. *Repositorio de La Universidad de Fuerzas Armadas ESPE*. Retrieved from http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/8675

Amanollahi, J., Tzanis, C., Abdullah, A. M., Ramli, M. F., & Pirasteh, S. (2013). Development of the models to estimate particulate matter from thermal infrared band of Landsat Enhanced Thematic Mapper. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *10*(6), 1245–1254. https://doi.org/10.1007

Ariza, A. (2013). Productos LDCM--LandSat 8. *Grupo Interno de Trabajo En Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas de IGAC. Bogotá*.

Barry, R. G., Chorley, R. J., & Guilló, A. M. (1972). *Atmósfera, tiempo y clima*. Barcelona.

Bedoya, J., & Martínez, E. (2009). Calidad del aire en el Valle de Aburrá Antioquia-Colombia. *Dyna*, *76*(158), 7–15.

Berk, A., Adler-Golden, S. M., Ratkowski, A. J., Felde, G. W., Anderson, G. P., Hoke, M. L., … Matthew, M. W. (2002). Exploiting MODTRAN radiation transport for atmospheric correction: The FLAASH algorithm. *Proceedings of the Fifth International Conference on Information Fusion. FUSION 2002.(IEEE Cat. No. 02EX5997)*, *2*, 798–803.

Bilguunmaa, M., Batbayar, J., & Tuya, S. (2014). Estimation of PM10 concentration using satellite data in Ulaanbaatar City. *Remote Sensing of the Atmosphere, Clouds, and Precipitation V*, *9259*, 92591O. https://doi.org/10.1117/12.2069149

Boichu, M., Chiapello, I., Brogniez, C., Péré, J.-C., Thieuleux, F., Torres, B., … Goloub, P. (2015). Current challenges in modelling far-range air pollution induced by the 2014--2015 Bárdharbunga fissure eruption (Iceland). *Atmospheric Chemistry and Physics*, *16*(17), 10831–10845.

Caselli, M. (2000). La contaminación atmosferica, Causas y fuentes. *Efectos Sobre El Clima, La Vegetación y Los Animales, 6ta Edición, Mexico*.

Cazanave, L. B., Lee, R. L., Varona, M. M., Rivas, S. F. P., Garcés, A. H., Cedeño, L. F. C., & Pérez, G. (2015). Calidad del aire en la Ciudad Universitaria José Antonio Echeverría por partículas e inmisiones de NO2 y SO2. *UCE Ciencia. Revista de Postgrado*, *3*(3).

Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, *113*(5), 893–903.

Chudnovsky, A., Tang, C., Lyapustin, A., Wang, Y., Schwartz, J., & Koutrakis, P. (2013). A critical assessment of high-resolution aerosol optical depth retrievals for fine particulate matter predictions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *13*(21), 10907–10917.

Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de teledetección espacial* (Vol. 453). Madrid: Ediciones Rialp Madrid.

Cohen, A. J., Anderson, H. R., Ostro, B., Pandey, K. D., Krzyzanowski, M., Künzli, N., … Samet, J. M. (2004). Urban air pollution. *Comparative Quantification of Health Risks: Global and Regional Burden of Disease Attributable to Selected Major Risk Factors*, *2*, 1353–1433.

Cooley T y Anderson, G. P. y F. G. W. y H. M. L. y R. A. J. y C. J. H. y G. J. A. y A.-G. S. M. y M. M. W. y B. A. (2002). FLAASH, a MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm, its application and validation. *EEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1414–1418.

Díaz Rodríguez, A. M. (2006). *Caracterización de los aerosoles atmosféricos y su influencia en los niveles de radiación UV en la región de Canarias*. Universidad de La Laguna.

Duncan, B. N., Prados, A. I., Lamsal, L. N., Liu, Y., Streets, D. G., Gupta, P., … Beyersdorf, A. J. (2014). Satellite data of atmospheric pollution for US air quality applications: Examples of applications, summary of data end-user resources, answers to FAQs, and common mistakes to avoid. *Atmospheric Environment*, *94*, 647–662.

El-Harbawi, M. (2013). Air quality modelling, simulation, and computational methods: a review. *Environmental Reviews*, *21*(3), 149–179.

Enkerlin Hoeflich, E. C., Cano, G., Garza Cuevas, R. A., & Vogel Martinez, E. (1997). *Ciencia ambiental y desarrollo sostenible*. International Thomson.

Feng, X., Li, Q., Zhu, Y., Hou, J., Jin, L., & Wang, J. (2015). Artificial neural networks forecasting of PM2. 5 pollution using air mass trajectory based geographic model and wavelet transformation. *Atmospheric Environment*, *107*, 118–128.

Gaviria, C. F., Muñoz, J. C., & González, G. J. (2012). Contaminación del aire y vulnerabilidad de individuos expuestos: un caso de estudio para el centro de Medellín. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, *30*(3), 316–327.

Gómez Comba, C. A. (2018). Contaminación del aire de Medellín por pm10 y pm2. 5 y sus efectos en la salud. *Universidad Militar Nueva Granada*, 21.

Guanter, L., Aben, I., Tol, P., Krijger, J. M., Hollstein, A., Köhler, P., … Landgraf, J. (2015). Potential of the Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) onboard the Sentinel-5 Precursor for the monitoring of terrestrial chlorophyll fluorescence. *Atmospheric Measurement Techniques*, *8*(3), 1337–1352.

Gupta, P., Christopher, S. A., Wang, J., Gehrig, R., Lee, Y. C., & Kumar, N. (2006). Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities. *Atmospheric Environment*, *40*(30), 5880–5892.

Gutiérrez, C. P., & Nieto, Á. L. M. (2006). *Teledetección: nociones y aplicaciones*. Universidad de Salamanca.

Gutiérrez, M. A. R. (2017). Uso de Modelos Lineales Generalizados (MLG) para la interpolación espacial de PM10 utilizando imágenes satelitales Landsat para la ciudad de Bogotá, Colombia. *Perspectiva Geográfica*, *22*(2).

Hartmann, D. L., Tank, A. M. G. K., Rusticucci, M., Alexander, L. V, Brönnimann, S., Charabi, Y. A. R., … others. (2013). Observations: atmosphere and surface. In *Climate change 2013 the physical science basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press.

Horbath, J. E. (2016). Tendencias y proyecciones de la población del área metropolitana del valle de Aburrá en Colombia, 2010-2030. *Notas de Población*, *1*, 29.

Hurtado Díaz, J. D., & Avendaño Cantor, D. F. (2017). *Guia técnica para la elaboración de Planes Empresariales de Movilidad Sostenible (PEMS) en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá*. Corporación Universitaria Lasallista.

Jankilevich, S. (2012). *Las cumbres mundiales sobre el ambiente Estocolmo, Río y Johannesburgo 30 años de historia ambiental*. Universidad de Belgrano Area de Estudios Ambientales y Urbanos.

Johnson A., R. (1988). *Applied multivariate analysis* (sixth).

Justice, C. O., Vermote, E., Townshend, J. R. G., Defries, R., Roy, D. P., Hall, D. K., … others. (1998). The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land remote sensing for global change research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *36*(4), 1228–1249.

Kaufman, Y. J., & Tanré, D. (1998). Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS. *NASA MODIS Algorithm Theoretical Basis Document, Goddard Space Flight Center*, *85*, 3–68.

King, M. D., Kaufman, Y. J., Tanré, D., & Nakajima, T. (1999). Remote sensing of tropospheric aerosols from space: Past, present, and future. *Bulletin of the American Meteorological Society*, *80*(11), 2229–2260.

Knowles, M. de las M., & others. (2016). *Cambio Climático: Una Mirada desde las Políticas y la Gestión Ambiental en Colombia* (Universidad Distrital). Retrieved from http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/4095/1/23102016. TESIS EEGA MARIA KNOWLES %282%29.pdf

Larsen, B. (2003). Hygiene and health in developing countries: defining priorities through cost benefit assessments. *International Journal of Environmental Health Research*, *13*(sup1), S37--S46.

Lim, H. S., MatJafri, M. Z., Abdullah, K., Saleh, N. M., & AlSultan, S. (2004). Remote sensing of PM10 from LANDSAT TM imagery. *Acrs 2004*, 739–744.

Llinares, J. A. (2007). *Módulo: Contaminación Atmosférica*.

Lopez, E. M., Quiroz, C. M., Cardoso, F. D., & Espinosa, A. M. (2007a). Contaminación Atmosférica y efectos sobre la salud de la población Medellin y su area metropolitana. Universidad de Antioquia.

Lopez, E. M., Quiroz, C. M., Cardoso, F. D., & Espinosa, A. M. (2007b). Contaminación Atmosférica y efectos sobre la salud de la población Medellin y su area metropolitana. *Centro de Investigaciones Facultad Nacional de Salud Publica Universidad de Antioquia, Medellín Colombia*.

Markham, B. L., Storey, J. C., Williams, D. L., & Irons, J. R. (2004). Landsat sensor performance: history and current status. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *42*(12), 2691–2694.

Mather, P. M., & Koch, M. (2011). *Computer processing of remotely-sensed images: an introduction*. Oxford: John Wiley & Sons.

Medellín comó vamos. (2016). *Encuesta de percepción ciudadana Medellín 2017*. Medellin: Medellin: Medell{\'\i}n Cómo Vamos.

Mejia Chavarriaga, M. L. (2016). *Lecciones aprendidas Proyecto Sistema de Alertas Tempranas de la ciudad de Medellin y el Valle de Aburrá-SIATA* (Universidad EAFIT). Retrieved from https://repository.eafit.edu.co/xmlui/bitstream/handle/10784/9181/MarthaLya_MejiaChavarriaga_2016.pdf?sequence=2&isAllowed=y

Ministerio de Ambiente, V. y D. T. (2008). *Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire*. Retrieved from http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/Protocolo+para+el+Monitoreo+y+seguimiento+de+la+calidad+del+aire.pdf/6b2f53c8-6a8d-4f3d-b210-011a45f3ee88

Miralles, J. M. (1991). *La teledetección en el seguimiento de los fenómenos naturales. Recursos renovables: agricultura* (Universidad Politécnica de Valencia, Ed.). Valencia, España: Universitat de València.

Organization World Health, & Others. (2004). Comparative quantification of health risks: global and regional burden of disease attributable to selected major risk factors. In A. R. Majid Ezzati, Alan D. Lopez & and Christopher J.L. Murray (Eds.), *Library Cataloguing-in-Publication Data* (1st ed.). Geneva.

Organization World Health, & Others. (2016). *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*. Geneva: World Health Organization.

Othman, N., Jafri, M. Z. M., & San, L. H. (2010). Estimating particulate matter concentration over arid region using satellite remote sensing: A case study in Makkah, Saudi Arabia. *Modern Applied Science*, *4*(11), 131.

Outillas, P. P., Rojas, J. C. G., & Ferrando, J. A. P. (2004). La teledetección en la planificación territorial. Aplicación de técnicas de clasificación para la elaboración de cartografía de los usos del suelo. *El Empleo de Los SIG y La Teledetección En Planificación Territorial*, 27.

Pabón, J. D. (2003). El cambio climático global y su manifestación en Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, (12), 111–119. https://doi.org/10.15446/rcdg

Parton, W. J., Morgan, J. A., Wang, G., & Del Grosso, S. (2007). Projected ecosystem impact of the prairie heating and CO2 enrichment experiment. *New Phytologist*, *174*(4), 823–834.

Poortinga, A., Bastiaanssen, W., Simons, G., Saah, D., Senay, G., Fenn, M., … Kadyszewski, J. (2017). A Self-Calibrating Runoff and Streamflow Remote Sensing Model for Ungauged Basins Using Open-Access Earth Observation Data. *Remote Sensing*, *9*(1), 86. https://doi.org/10.3390/rs9010086

Pope III, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the Air & Waste Management Association*, *56*(6), 709–742.

Rojas, J. C., Duque, J. A. C., & Hernández, F. (2017). Metodología para medir las concentraciones de aerosoles atmosféricos usando técnicas de teledetección. *Puente*, *9*(2), 61–77.

Romero Placeres, M., Diego Olite, F., & Álvarez Toste, M. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiologia*, *44*(2), 0. Retrieved from http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223214848008

Roy, D. P., Wulder, M. A., Loveland, T. R., Woodcock, C. E., Allen, R. G., Anderson, M. C., … others. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, *145*, 154–172.

Saleh, S. A. H., & Hasan, G. (2014). Estimation of PM10 concentration using ground measurements and Landsat 8 OLI satellite image. *J Geophys Remote Sens*, *3*(2), 49–2169.

Schmetz, J., Pili, P., Tjemkes, S., Just, D., Kerkmann, J., Rota, S., & Ratier, A. (2002). An introduction to Meteosat second generation (MSG). *Bulletin of the American Meteorological Society*, *83*(7), 977–992.

Shaheen, A., Kidwai, A. A., Ain, N. U., Aldabash, M., & Zeeshan, A. (2017). Estimating Air Particulate Matter 10 Using Landsat Multi-Temporal Data and Analyzing its Annual Temporal Pattern over Gaza Strip, Palestine. *Journal of Asian Scientific Research*, *7*(2), 22.

Sifakis, N., Soulakellis, N., Paronis, D., & Mavrantza, R. (1998). Quantitative mapping of air pollution density using Earth observations: a new processing method and application to an urban area. *International Journal of Remote Sensing*, *1*, 3289–3300.

Sobrino, J. A., Raissouni, N., Kerr, Y., Olioso, A., Lopez Garcia, M., Belaid, A., & Cuenca, J. (2001). *Teledetección* (J. A. Sobrino, Ed.). Valencia, España: Universitat de Valencia.

Ung, A., Wald, L., Ranchin, T., Weber, C., Hirsch, J., Perron, G., & Kleinpeter, J. (2002). Satellite data for the air pollution mapping over a city--the use of virtual station. *Proceedings of the 21th EARSeL Symposium., AA Balkema Rotterdam, Brookfield*, 147–151.

Vicente, B. (2014). *Cambio Climatico Global* (Segunda; Libros del Zorzal, Ed.). Buenos Aires: Obtenido de?` Qué es el calentamiento global.

Wang, J., & Christopher, S. A. (2003). Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM2. 5 mass: Implications for air quality studies. *Geophysical Research Letters*, *30*(21).

Wong, C. J., MatJafri, M. Z., Abdullah, K., & Lim, H. S. (2009). Development of Low Cost Air Quality Monitoring System by Using Image Processing Technique. In *Image Processing*. https://doi.org/10.5772 / 7048