



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Ambiental

Determinación de concentración de Material Particulado 2.5 (PM_{2.5}) con el uso de aeronaves tripuladas a distancia en el área del parque industrial de la ciudad de Cuenca

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Ambiental

Autores:

Pedro David Galarza Poveda

CI:0106528565

Correo electrónico: pedrogal33@gmail.com

Diego Fabián Tinoco Peralta

CI: 0106602444

Correo electrónico: diegotinoco41@gmail.com

Tutor:

Blgo. Julio Danilo Mejía Coronel, MSc

C.I. 0103638581

Cuenca, Ecuador

19-enero-2022



Resumen:

En el presente trabajo de titulación se determinó un modelo matemático en base a la concentración de Material Particulado 2.5 ($PM_{2.5}$) en el área del parque industrial de la ciudad de Cuenca; a través de la identificación de una ecuación empírica, mediante la información obtenida de dos cámaras multiespectrales, la primera con propiedades RGB y la segunda con propiedades NIR, montadas en un dron (o UAV del inglés Unmanned Aerial Vehicle).

El modelo generado fue validado al comparar los valores de niveles digitales de las bandas espectrales Red, Green, Blue y NIR con las concentraciones del contaminante propio de la estación de monitoreo continuo perteneciente a la empresa EMOV EP (Código: CCA). Se contó con un total de 50 imágenes de la zona de interés, adquiridas con una periodicidad de 1 hora, en el sector parque industrial de la ciudad de Cuenca. Se determinó la factibilidad de aplicar este modelo matemático en zonas específicas, al obtener un $R^2= 0,68$, para determinar concentraciones de $PM_{2.5}$ sin la necesidad de recurrir a estaciones de monitoreo continuo del contaminante dentro de la ciudad de Cuenca.

Palabras clave: Dron. Cámara multiespectral. Material particulado 2.5. Regresión lineal múltiple.



Abstract:

In the present degree work, a mathematical model is determined based on the concentration of Particulate Material 2.5 (PM_{2.5}) in the area of the industrial park of the city of Cuenca; Through the identification of an empirical equation, through the information obtained from two multispectral cameras, the first with RGB properties and the second with NIR properties, mounted on a drone (or UAV for Unmanned Aerial Vehicle).

The model generated was validated by comparing the values of digital levels of the spectral bands Red, Green, Blue and NIR with the concentrations of the pollutant of the continuous monitoring station belonging to the company EMOV EP (Code: CCA). There were a total of 50 images of the area of interest, acquired every 1 hour, in the industrial park sector of the city of Cuenca. The feasibility of applying this mathematical model in specific areas will be extended, by obtaining an $R^2 = 0,68$, to determine concentrations of PM_{2.5} without the need to resort to continuous monitoring stations for the pollutant within the city of Cuenca.

Keywords: Drone. Multispectral camera. Particulate matter 2.5. Multiple linear regression.



Índice del Trabajo

Contenido

AGRADECIMIENTOS	13
DEDICATORIA.....	14
DEDICATORIA.....	15
1. Introducción	16
2. Objetivos	19
3. Marco teórico - Estado del Arte	19
3.1 Contaminación atmosférica	19
3.2 Contaminantes atmosféricos	20
3.3 Teledetección	23
3.3.1 Técnicas de teledetección	24
3.3.2 Sensores de teledetección	24
3.3.3 Espectro electromagnético	25
3.4 Imágenes satelitales	27
3.4.1 Imágenes multiespectrales	27
3.4.2 Usos de imágenes multiespectrales	27
3.5 Aeronave tripulada a distancia.....	28
3.5.1 Aparatos con ala rotatoria.....	29
3.5.2 Aparatos con ala fija	30
3.6 Imágenes procedentes de un dron y sus ventajas.....	31
3.6.1 Usos y ventajas de imágenes capturadas por un dron	31
3.6.2 Tipos de imágenes digitales	32
3.6.3 Formato de la imagen digital	34
3.7 Estado del Arte	34



4. Materiales y Métodos	39
4.1 Diseño de la investigación	39
4.2 Área de estudio.....	40
4.3 Esquema de procesos	42
4.4 Obtención de fotografías multiespectrales de la zona industrial de la ciudad de Cuenca	43
4.4.1 Materiales y equipos utilizados para la recopilación de información	43
4.4.2 Calibración de equipos	43
4.4.3 Campaña para la toma de datos.....	46
4.5 Procesamiento de las imágenes multiespectrales, fotogrametría	46
4.5.1 Procesamiento de imágenes	46
4.5.2 Fotogrametría	47
4.6 Construcción de base de datos con información cuantitativa a partir de fotografías multiespectrales y valores de la estación de monitoreo continuo .	52
4.7 Determinación de ecuación empírica para la obtención la concentración de PM _{2.5}	58
5. Resultados.....	59
5.1 Análisis de correlación	59
5.2 Análisis de regresión.....	63
5.3 Validación del modelo de estimación de concentración de PM _{2.5}	70
5.4 Mapas de estimación de la concentración de PM _{2.5}	72
5.5 Discusión / Análisis	75
5.5.1 Variación temporal / horaria de concentración PM _{2.5}	75
5.5.2 Análisis bandas espectrales y análisis modelos matemáticos.....	77
5.5.3 Análisis normativa y su relación con la salud la humana	79
6. Conclusiones	81



6.1 Limitaciones 82

6.2 Recomendaciones 83

6.3 Futuras investigaciones 84

Referencias 85

Anexos 99



Índice de figuras

Figura 1. Principio de funcionamiento de sensor pasivo y sensor activo respectivamente	25
Figura 2. Rango del espectro electromagnético (cámara digital, cámara multispectral y cámara hiperespectral).	26
Figura 3. Modelos de DRON de ala rotatoria.	30
Figura 4. Modelos de DRON de ala fija.	31
Figura 5. Esquema de un sistema de agricultura de precisión.	32
Figura 6. Mapa de Área de Estudio; CCA representa una estación de monitoreo continuo de PM _{2.5}	41
Figura 7. Calibración de sensores, DRON DJI Phantom 4 pro.	44
Figura 8. Calibración de giroscopio/brújula, DRON DJI Phantom 4 pro.	44
Figura 9. Condiciones para la calibración de imágenes RGB en programa MAPIR.	45
Figura 10. Condiciones para la calibración de imágenes NIR en programa MAPIR.	45
Figura 11. Plan de vuelo para la toma de fotografías aéreas.	47
Figura 12. Condiciones para orientar fotografías.	48
Figura 13. Vista superior de todo el conjunto de fotografías.	49
Figura 14. Vista lateral y eliminación de fotografías con potencial de generar error.	50
Figura 15. Condiciones para creación de la nube de puntos.	50
Figura 16. Condiciones para la creación de MDE.	51
Figura 17. Condiciones para creación y exportación de ortomosaico.	52
Figura 18. Diagrama de dispersión: PM _{2.5} vs Red.	60
Figura 19. Diagrama de dispersión: PM _{2.5} vs Green	61
Figura 20. Diagrama de dispersión: PM _{2.5} vs Blue	62



Figura 21. Diagrama de dispersión: PM _{2.5} vs NIR	62
Figura 22. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson.....	63
Figura 23. Gráficas de residuos para PM _{2.5} modelo A.	68
Figura 24. Gráficas de residuos para PM _{2.5} modelo B.	69
Figura 25. Respuesta predicha vs valores reales del modelo A.....	71
Figura 26. Gráfica de respuesta calculada vs respuesta real del modelo B.....	72
Figura 27. Mapas de concentración horaria de PM _{2.5} (ug/m ³).....	74
Figura 28. Promedio horario de concentración PM _{2.5} . Sector parque industrial, Cuenca.	76



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Pedro David Galarza Poveda en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Determinación de concentración de Material Particulado 2.5 (PM_{2.5}) con el uso de aeronaves tripuladas a distancia en el área del parque industrial de la ciudad de Cuenca", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, Ecuador, 19/01/2022

Pedro David Galarza Poveda

C.I: 0106528565



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Diego Fabián Tinoco Peralta en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Determinación de concentración de Material Particulado 2.5 (PM_{2.5}) con el uso de aeronaves tripuladas a distancia en el área del parque industrial de la ciudad de Cuenca", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, Ecuador, 19/01/2022

Diego Fabián Tinoco Peralta

C.I: 0106602444



Cláusula de Propiedad Intelectual

Pedro David Galarza Poveda, autor/a del trabajo de titulación "Determinación de concentración de Material Particulado 2.5 (PM_{2.5}) con el uso de aeronaves tripuladas a distancia en el área del parque industrial de la ciudad de Cuenca ", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, Ecuador, 19/01/2022

Pedro David Galarza Poveda

C.I: 0106528565



Cláusula de Propiedad Intelectual

Diego Fabián Tinoco Peralta, autor/a del trabajo de titulación "Determinación de concentración de Material Particulado 2.5 (PM_{2.5}) con el uso de aeronaves tripuladas a distancia en el área del parque industrial de la ciudad de Cuenca", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, Ecuador, 19/01/2022

Diego Fabián Tinoco Peralta

C.I: 0106602444



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por darme la fuerza, sabiduría y sobre todo salud para culminar con mi etapa universitaria y realizar este estudio de la mejor manera.

También quiero agradecer a nuestro director, el Blgo. Danilo Mejía por su guía y ayuda, ya que gracias a que compartió sus conocimientos fuimos capaces de llevar a cabo este estudio de la mejor manera.

Del mismo modo agradezco a la Universidad de Cuenca y a los profesores que la conforman por brindarme los materiales y conocimientos necesarios para realizar el presente estudio de la mejor manera.

Pedro David Galarza Poveda

Primeramente, agradecer a Dios por brindarme la fortaleza y sabiduría para salir adelante con el presente proyecto de titulación. De igual manera mi más sincero agradecimiento para mi director de tesis Blgo. Danilo Mejía, a la Universidad de Cuenca y a todos los docentes que me han transmitido su conocimiento tanto intelectual como enseñanzas de vida, que me ha permitido formarme a lo largo de mi vida universitaria.

Diego Fabián Tinoco Peralta



DEDICATORIA

A mis padres, Peter y Sandra, por su apoyo incondicional durante toda mi vida, por brindarme todo lo necesario para poder lograr las metas que me he propuesto, también a mi hermana Doménica y mis abuelos tanto paternos como maternos por creer en mí pese a las adversidades, ya que gracias a ellos y sus palabras me motivaron para seguir adelante y nunca rendirme. Finalmente quiero dedicar este logro a todos mis amigos que me apoyaron y estuvieron conmigo en los momentos difíciles ya que fueron un apoyo durante todo este tiempo para culminar de la mejor manera este estudio.

Pedro David Galarza Poveda



DEDICATORIA

Este proyecto de graduación va dedicado a todos mis seres queridos, primordialmente a mi madre Ana, mi padre Fabián, mis hermanos Douglas y Julián, a mi abuelita Cruz y a mi abuelita Melida, que todos ellos con su motivación y apoyo constante me han inspirado a seguir siempre adelante.

Con el mismo cariño y aprecio para mis tíos, primos y amigos que me han alentado día a día a conseguir una de mis metas de vida.

Diego Fabián Tinoco Peralta



1. Introducción

La deteriorada calidad del aire actualmente representa un serio problema para la salud pública, debido a los problemas que causa sobre todo en los grupos vulnerables, niños y adultos mayores, debido en gran medida al desarrollo industrial, poblacional, económico y tecnológico actual. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), se estima que nueve de diez personas en el mundo respiran aire contaminado, provocando 7 millones de muertes anuales por causas relacionadas con la polución (OMS, 2013).

En la actualidad, la calidad del aire puede ser estimada por medio de mediciones satelitales y mediciones in situ a través del uso de redes de estaciones y equipos de monitoreo de calidad del aire. La principal diferencia entre estos métodos de medición se basa en la resolución, precisión y rango (Nisperuza et al., 2020).

Si bien las mediciones en tierra son más precisas, estas carecen de un alto rango de observación, lo cual no sucede con mediciones satelitales cuyo rango es amplio, pero su temporalidad podría ser un problema debido a que esto está regulado por su órbita y la distancia a la que se encuentra del planeta (Li & Hou, 2015). Actualmente el método más usado para determinar la calidad del aire es a través de estaciones y redes de monitoreo, INE-SEMARNAT (2003) menciona:

“Una red de medición de la calidad del aire es aquella que enlaza dos o más estaciones para poder determinar la calidad del aire de la región. En este sentido, una red pretende tener una mayor cobertura para evaluar el aire ambiente de una extensión territorial amplia”.

En Ecuador actualmente existen 2 redes de monitoreo de calidad de aire, la primera ubicada en la ciudad de Quito, la cual funciona desde el año 2003, cuenta con 44 estaciones, de las cuales 8 son automáticas y 36 manuales (MAE, 2010), la segunda se ubica en la ciudad de Cuenca, misma que se encuentra activa desde el año 2008; cuenta con 19 estaciones, de las cuales 2 son automáticas y 17 manuales (EMOV, 2017).



Aunque actualmente se lleva a cabo un registro conjunto de las emisiones al aire en estas 2 ciudades, la información obtenida no es suficiente para determinar la calidad del aire a nivel nacional, debido a que no ofrecen una cobertura global y su generalización es limitada (Espinoza & Molina, 2014). Esto se debe en primer lugar al costo de los instrumentos de monitoreo y a la falta de interés por parte del gobierno para implementar estaciones de monitoreo, con el fin de obtener un visión más certera y general de las emisiones en el país y de este modo tomar las decisiones requeridas frente al escenario observado (Cobo & Arcos, 2016). Actualmente se comenzó a utilizar los satélites y sus diversos sensores remotos, con el fin de obtener información a gran escala y con cierta regularidad temporal (dependiendo de la órbita del satélite). Según varios estudios se indica que los datos satelitales son útiles para detectar y rastrear partículas contaminantes, proporcionando información cualitativa con una precisión aceptable, la cual, a través de un tratamiento de datos o técnicas de teledetección, se puede extrapolar esta información en valores cuantitativos, con el fin de utilizarlos en otros estudios (Castro, 2019). Entre los satélites más utilizados se encuentra la serie Landsat y Sentinel, debido a que los sensores que poseen son los más adecuados para captar la longitud de onda de estos contaminantes (Castro Coca, 2019).

El monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Cuenca, inició en 1986 de forma parcial e irregular, diversos estudios realizados a partir de datos recabados en la ciudad indican una disminuida calidad de aire relacionada con una mayor morbilidad respiratoria (Palacios & Espinoza, 2014). La calidad del aire de la ciudad de Cuenca, posiblemente en los últimos años ha empeorado debido al aumento del parque automotor, crecimiento del sector industrial y actividades humanas en general. Esto se debe a la generación de mayores cantidades de gases contaminantes (NO_x , CO_x , SO_2 , O_3 , material particulado, vapor de agua, entre otros), productos principalmente de una combustión incompleta (Anderson et al., 2012. Anenberg et al., 2010). La contaminación atmosférica no afecta solamente a los seres humanos, sino también en gran medida a los diferentes ecosistemas, especies vegetales y animales que se encuentran en áreas circundantes a los focos de emisión de los gases



contaminantes (Rohi et al., 2012). Cabe destacar el efecto perjudicial que la contaminación del aire tiene sobre el clima y los cultivos agrícolas (Settele et al., 2014).

Pese a la red de monitoreo presente en la ciudad de Cuenca, los datos obtenidos de esta, resultan insuficiente para determinar de forma global la calidad del aire en la ciudad, debido a que los datos obtenidos son puntuales y no se podría generalizar los mismos a extensiones grandes de territorio (Espinoza, 2011). La teledetección satelital representa una mejor opción, pero en áreas relativamente grandes, ya que, debido a su alcance global, los datos obtenidos son generales y no representan a áreas pequeñas, por lo cual se ha visto la necesidad de utilizar técnicas alternativas para determinar concentraciones de gases contaminantes, las cuales se utilizarán en el estudio a través de un vehículo aéreo no tripulado.

El uso de tecnologías de percepción remota para la determinación de contaminantes atmosféricos, trae consigo varios beneficios, como costos operacionales relativamente asequibles, evaluación de concentración de gases contaminantes en tiempo real, además se puede rastrear al mismo tiempo varios puntos de muestreo (López & Mandujano, 2005. Rohi et al., 2012).

El presente trabajo tiene la finalidad de determinar la concentración del contaminante atmosférico $PM_{2.5}$ en el área industrial de la ciudad de Cuenca, a través de la aplicación de una ecuación empírica que represente la relación existente entre los valores de niveles digitales de las bandas espectrales Red, Green, Blue y NIR, obtenidos a partir de imágenes multiespectrales, mediante el uso de un vehículo aéreo no tripulado o UAV (del inglés Unmanned Aerial Vehicles) y valores obtenidos del contaminante en la estación de monitoreo continuo de la ciudad de Cuenca, ubicada en el parque industrial (CCA). Lo que permite determinar las concentraciones de dicho contaminante, no solamente de manera puntual sino a una escala espacial mayor.



2. Objetivos

• Generales

Determinar la concentración de Material Particulado 2.5 ($PM_{2.5}$) mediante modelo matemático obtenido de imágenes multiespectrales usando aeronaves tripuladas a distancia en el parque industrial de la ciudad de Cuenca.

• Específico

- Obtener fotografías multiespectrales de la zona industrial de la ciudad de Cuenca.
- Generar base de datos con información cuantitativa a partir de fotografías multiespectrales y datos de estación de monitoreo continuo.
- Generar un modelo empírico para la cuantificación de concentración de $PM_{2.5}$.
- Validar el modelo de estimación de concentración de contaminante atmosférico $PM_{2.5}$.
- Generar mapa de concentración de $PM_{2.5}$ de la zona industrial de la ciudad de Cuenca.

3. Marco teórico - Estado del Arte

3.1 Contaminación atmosférica

El impacto de la contaminación atmosférica en el clima y el medio ambiente es una ciencia relativamente nueva de estos últimos siglos, que surge con la revolución industrial y el aumento en el uso de combustibles fósiles (Akimoto, 2003). Los contaminantes atmosféricos provienen generalmente de fuentes fijas de combustión (industrias) y fuentes móviles (automotores), estos a su vez se pueden distinguir entre contaminantes primarios y secundarios (Ballester, 2005).



Los contaminantes primarios se caracterizan por ser producidos de forma directa por el hombre es decir se producen a través de actividades que generan emisiones a la atmósfera. Los contaminantes secundarios provienen de las reacciones químicas que se dan en la atmósfera a través de la reacción de los contaminantes primarios con ozono y otros compuestos por acción de la radiación solar (O'Ryan & Larraguibel, 2000). Es pertinente reconocer que aún existen muchas dudas acerca los efectos de los contaminantes atmosféricos en la salud, sin embargo, se conoce bien que estos pueden afectar al sistema respiratorio y cardiocirculatorio, dependiendo de su concentración y dispersión (Ballester, 2005). Según la OMS “Se ha estimado que la contaminación ambiental debido a partículas es responsable de 1,4 % de todas las muertes anuales” (OMS, 2013).

3.2 Contaminantes atmosféricos

Existen muchos contaminantes atmosféricos ya sean primarios o secundarios; producidos en su mayoría por actividades humanas. Para efectos del estudio se abordarán 5 contaminantes los cuales se describen a continuación.

- Ozono (O_3)

El Ozono es un compuesto gaseoso de color azulado con una vida media relativamente corta y con gran variabilidad en su distribución espacial, presente en varias reacciones en las que se crea o destruye por igual, por esto resulta difícil estimar la cantidad de ozono promedio en una zona determinada (Cuevas, 1995). El ozono se considera un contaminante secundario debido a que se forma por la reacción con otros contaminantes como dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), óxidos de nitrógeno (NO_x) y aerosoles, así como otros hidrocarburos (Suarez, 2006). El ozono puede encontrarse en la tropósfera o estratósfera, dependiendo del lugar donde se encuentre este podría ser un gas contaminante. El ozono a nivel superficial (troposférico) se considera como un gas de efecto invernadero ya que se considera como el principal responsable del smog fotoquímico (Cuevas, 1995). El ozono también puede llegar a afectar los tejidos de



plantas y animales, así como el aparato respiratorio, siendo un factor de riesgo para la población más sensible (Castell & Mantilla, 2002).

- Dióxido de Nitrógeno (NO_2)

El dióxido de nitrógeno se define como un “gas traza” presente en la atmósfera como resultado de actividades antropogénicas y procesos naturales (Geffen, 2019). Aproximadamente el 95 % de las emisiones de NO_x son en forma de NO . En presencia de luz solar el nitrógeno entra en un ciclo fotoquímico que involucra el ozono convirtiendo el NO en NO_2 . Geffen (2019) menciona “En la troposfera el NO_2 juega un papel importante en los problemas de calidad de aire, afectando de manera directa a la vida”. En relación al NO_2 estratosférico, su origen se da por la oxidación del NO que funciona como catalizador para la formación del ozono. En relación al NO_2 estratosférico su origen se da por la oxidación del NO que funciona como catalizador para la formación del ozono (Ballester, 2005).

- Dióxido de azufre (SO_2)

El Dióxido de azufre es un gas contaminante de origen primario, es un gas incoloro no inflamable, el cual se puede combinar de manera sencilla en la atmósfera con vapor de agua convirtiéndose en ácido sulfúrico el cual es uno de los principales culpables de la lluvia ácida (Arroyo & Rubbing, 2017). Según Alvarado (2006) “Durante su proceso de oxidación en la atmósfera, este gas forma sulfatos, es decir, sales que pueden ser transportadas en el material particulado respirable (PM_{10}) y que en presencia de humedad forman ácidos. Luego, estos ácidos son una parte importante del material particulado secundario o fino ($\text{PM}_{2.5}$)”. El origen de este gas se da principalmente por las emisiones de plantas de generación de carbón o petróleo, calderos industriales, incineradores, automotores y de forma natural por erupciones volcánicas (Riaño & Yesid, 2019). Se ha encontrado información acerca de que este gas es nocivo para el sistema respiratorio, en especial para personas que padecen de asma y bronquitis crónica (Alvarado, 2006).

- Material particulado 10 (PM_{10})



El material particulado (MP) es un conjunto de partículas líquidas y sólidas emitidas directamente al aire, se destaca principalmente polvo de productos de la agricultura, polvo de vías, partículas resultantes de procesos productivos y hollín procedente de la combustión incompleta, entre otros (Arciniégas, 2012; Fang et al., 2013). El MP debido a su tamaño y densidad permanece suspendido en el aire largos periodos, estas partículas se forman por una compleja mezcla de productos químicos y/o elementos biológicos tales como: compuestos orgánicos volátiles (COV), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), metales, sales y endotoxinas; estos pueden interactuar entre sí dando lugar a la formación de nuevos compuestos (Billet et al., 2007). Para su identificación se clasifican de acuerdo a su diámetro aerodinámico, este corresponde al diámetro de una esfera uniforme en unidad de densidad que alcanza la misma velocidad terminal de asentamiento que la partícula de interés, la cual está determinado por la forma y densidad de la partícula, así PM_{10} indica el tamaño de partícula que cuyo diámetro varía entre 10 y 2.5 micrómetros (μm) (García, 2002; Bell et al., 2004).

- Material particulado 2.5 ($PM_{2.5}$)

El $PM_{2.5}$ engloba a todas las partículas cuyo diámetro es menor a 2.5 μm ; estas pueden variar con respecto a su concentración y composición química según el tiempo y lugar (Pöschl, 2005). Se clasifican según su origen en partículas primarias, provenientes de fuentes directas como: erupciones volcánicas, combustión incompleta de combustibles fósiles, la quema de biomasa y desgaste de carreteras, entre otros; y partículas secundarias: provenientes de la conversión de gases a partículas en la atmósfera (Suárez et al., 2017; Pöschl, 2005).

A diferencia del resto de partículas de diámetros superiores, las $PM_{2.5}$ tienen su principal origen en fuentes de carácter antropogénico (emisiones de combustiones incompletas de vehículos diésel) (Linares, 2008). Su tiempo de permanencia es variado e indeterminado dado a las características propias de cada partícula (Xianling, Yixiny Xi, 2018). El $PM_{2.5}$ tiene



componentes ácidos y representan un mayor riesgo para la salud porque pueden llegar a la profundidad de los pulmones, y algunas pueden alcanzar el torrente sanguíneo (Xianling, Yixin y Xi, 2018). Debido a esto, es importante tener en cuenta los niveles máximos permisibles de contaminación determinados por la OMS como un riesgo para la salud humana, los cuales son: 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de media anual y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de media en 24 h para el PM_{10} y de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de media anual y 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de media en 24 h para el $\text{PM}_{2.5}$ (OMS, 2021).

Según Trédaniel et al., (2013) y estudios realizados por Torres y Galindo, (2016) debido a su composición química, los efectos de la sedimentación de este contaminante en el ambiente pueden provocar:

- Acidificación de lagos y arroyos.
- Cambio en el balance nutricional de las aguas costeras y de las grandes cuencas fluviales.
- Reducción de los nutrientes del suelo.
- Daño en los bosques sensibles y cultivos agrícolas.
- Efectos perjudiciales sobre la diversidad de ecosistemas.
- Afecta al crecimiento vegetal y a la fauna.
- Reducen la visibilidad.
- Influyen en los cambios de temperatura.
- Pueden ocasionar daños en las edificaciones.

3.3 Teledetección

Su funcionamiento se basa en la disposición de una fuente de energía, generalmente el sol. Los rayos solares se reflejan con diferente intensidad, según las características propias de las diferentes zonas de la superficie terrestre (Lozano, 2021). Para el caso de datos adquiridos por sensores adaptados a drones, en su mayoría se extraen en tierra directamente del sensor, son procesados en computadores de alta gama. Posteriormente



la interpretación de imágenes puede ser de forma visual o digital, destinada a facilitar la información de interés para el usuario final (Parody & Zapata, 2018).

3.3.1 Técnicas de teledetección

Existe una gran cantidad de satélites alrededor del planeta, miles de estos se encuentran enfocados en la observación terrestre, recolectando un enorme volumen de información de diversa índole (Leandro et al., 2019). Esta tecnología se basa en las propiedades de la radiación electromagnética y su interacción con los objetos presentes en la superficie terrestre (Romero, 2006). Los autores Aguilar et al (2014) señalan que la interacción entre objetos y sensor se da mediante el flujo energético proveniente de la energía emitida por el propio sensor presente en un satélite. O a su vez por la reflexión de la luz solar en la superficie terrestre. Según Castillo (2012), las imágenes de satélite requieren de operaciones de procesamiento o correcciones previas a la extracción de la información, con el fin de minimizar los errores más comunes encontrados en sensores remotos, los cuales son de tipo radiométrico y geométrico. Estos errores pueden generarse a partir de fallas en la plataforma, el sensor, rotación planetaria y por la atmósfera (Arango et al., 2005). Las imágenes obtenidas a partir de teledetección se han utilizado con éxito para recuperar información importante sobre la presencia y concentración de los distintos contaminantes atmosféricos, los mismos que son determinantes para la calidad de vida de todos los organismos terrestres (Chang et al., 2016; Morgan et al., 2020; Villa et al., 2016).

3.3.2 Sensores de teledetección

En teledetección una parte importante del proceso implica el uso de sensores, los cuales pueden detectar la energía reflejada o emitida por las cubiertas terrestres, codificar y almacenar la información obtenida (Bedoya, 2016). Para que la teledetección ocurra debe existir una interacción energética entre la tierra y el sensor, esto puede darse por reflexión de la energía solar o mediante un haz artificial que genere una reflexión y pueda ser captado por el sensor (Chuvieco, 2000).

Los sensores utilizados en teledetección se pueden clasificar en 2 tipos, sensores pasivos y activos, la primera se basa en un principio de que todos los objetos emiten radiación de microondas de cierta magnitud debido a la presencia del sol la cual es captada y transformada en información por el sensor (Acevo, 2011). Por último, los sensores activos se diferencian de los pasivos debido a que estos captan una fuente de energía emitida por el mismo sensor luego de que estas sean reflejadas por el objeto de interés (Chuvieco, 2000).

En la figura 1 se observa la representación gráfica del funcionamiento de los 2 tipos de sensores.

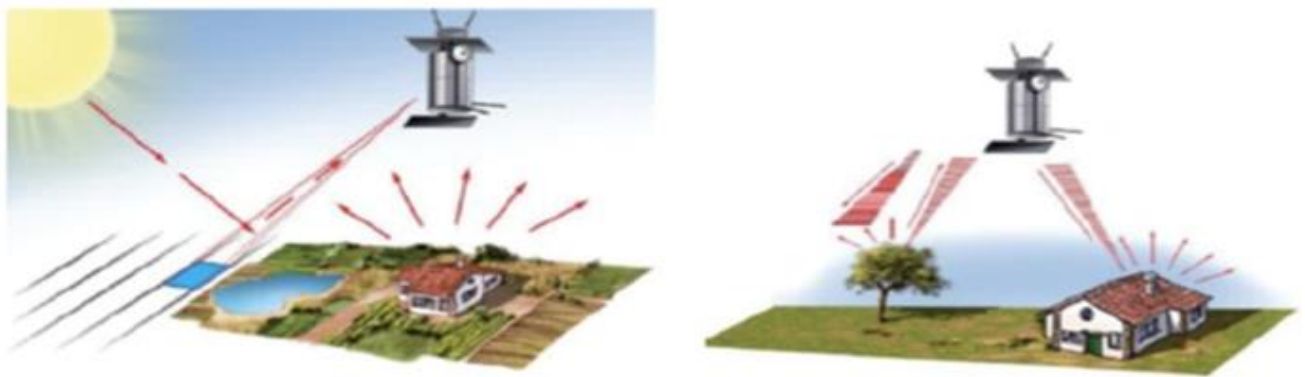


Figura 1. Principio de funcionamiento de sensor pasivo y sensor activo respectivamente

Fuente: Cartografiatematicaequipo2.blogspot.com/p/eficacia-sde-los-mapas.

3.3.3 Espectro electromagnético

La radiación electromagnética es el flujo de energía de un objeto propagado como ondas electromagnéticas, esta radiación puede tener origen artificial o natural, el conjunto de todas las frecuencias discretas o continuas que se producen se denomina espectro electromagnético (Luque, 2012). El espectro electromagnético se divide en diferentes bandas de frecuencia, dado que las ondas electromagnéticas tienen diferente

comportamiento dependiendo del medio de propagación, la procedencia y la manera de interactuar con la materia (Luque, 2012).

En la figura 2 se aprecia el rango del espectro electromagnético, capturado por diferentes sensores que pueden ser montados a un dron. Se capta desde una cámara digital que registra longitudes de onda RGB (espectro visible), una cámara multispectral con sensores adicionales a las del espectro no visible, o a su vez una cámara hiperespectral conformada por un mayor número de bandas (Lozano, 2021).

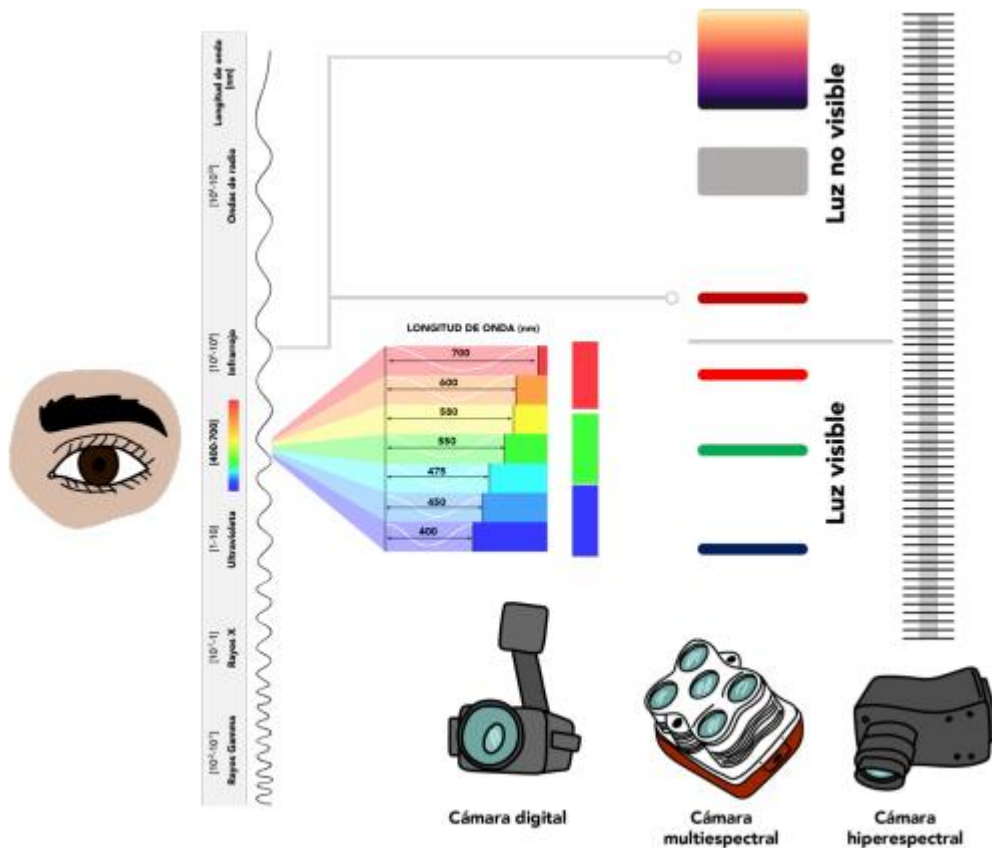


Figura 2. Rango del espectro electromagnético (cámara digital, cámara multispectral y cámara hiperespectral).

Fuente: Lozano, 2021.



3.4 Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales son el resultado de capturar radiación ya sea emitida o reflejada por la superficie terrestre, a través de un sensor a bordo de un satélite artificial. Existen varios tipos de imágenes satelitales las cuales varían en base a sus colores, resolución, elevación y objetivo. La calidad de estas depende en gran medida del equipo utilizado para capturarlas y la altitud. Una gran desventaja es que gracias a su resolución se puede observar un área de forma general, pero no se puede visualizar los detalles que la conforman por su baja resolución. Otra desventaja es que se ven notablemente afectadas por las condiciones meteorológicas al momento de realizar la toma (Jara & Marcelo, 2018). Las imágenes satelitales se dividen en 3 tipos las cuales son: Imágenes Pancromáticas, Multiespectrales e Hiperespectrales. Las imágenes más comunes y útiles son las imágenes multiespectrales.

3.4.1 Imágenes multiespectrales

Las imágenes multiespectrales son aquellas captadas por medio de un sensor digital, el cual mide la reflectancia de muchas bandas. Un mismo sensor puede medir diversas partes del espectro visible en base a la longitud de onda de estas. Estos valores de reflectancia distintos pueden ser combinados para crear imágenes de color. Actualmente los satélites en órbita miden la reflectancia simultánea en bandas distintas (Jara & Marcelo, 2018).

3.4.2 Usos de imágenes multiespectrales



Las imágenes multiespectrales tienen una gran variedad de usos en el área de topografía, agricultura y calidad del aire (Torres & Vivanco, 2018). Entre los principales usos de las imágenes multiespectrales se tiene:

- Determinar y distinguir rocas superficiales, así como su composición.
- Delimitar terrenos y fronteras.
- Determinar cuerpos de agua y estimar su profundidad.
- Determinar las concentraciones de contaminantes atmosféricos en base a su longitud de onda, se basa en transformar los valores de radiación a reflectancia través de fórmulas matemáticas-físicas tomando en cuenta factores como el ángulo del sol, altitud y reflectancia de la superficie a analizar. Para combinarlas y formar un modelo matemático que pueda llegar a determinar de manera aceptable las concentraciones de varios tipos de contaminantes (Torres & Vivanco, 2018).

3.5 Aeronave tripulada a distancia

Los drones, vehículos aéreos tripulados a distancia o también conocidos como vehículos aéreos no tripulados (UAVs), originalmente fueron de uso netamente militar durante décadas, en la actualidad su uso se ha expandido a aplicaciones científicas y civiles (Peräjärvi et al., 2008; Yoon & Díaz, 2018). Los drones aéreos pueden clasificarse en dos categorías diferentes según su diseño, de ala fija el cual su aplicación principal es para muestreo a largas distancia, ala rotatoria utilizada en estudios focalizados. Este último tiene evidentes ventajas en lo que respecta a maniobrabilidad, coste económico y aspectos de mantenimiento (Chang et al., 2016). Se destaca su aplicación para soporte de sistemas de muestreo de aire, analizadores y sensores, complementando o reemplazando las formas tradicionales de muestreo como lo son los dirigibles, aeronaves, torres meteorológicas entre otros (Wintel et al., 2013; Greenberg et al., 1999). La amplia variedad de sensores que pueden ser utilizados a través de un dron permiten el monitoreo continuo de diferentes parámetros meteorológicos (presión, temperatura, humedad), la presencia de gases

contaminantes de la atmósfera (CO_2 , CO , NO_2 , NO , O_3 , SO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$), entre otras aplicaciones (Chang et al., 2016; Villa et al., 2016).

3.5.1 Aparatos con ala rotatoria

Los drones de ala giratoria vuelan debido a la sustentación generada por sus alas rotatorias o debido a las palas de motor, que se incorporan generalmente en el mástil y a su vez forman un sistema mecánico denominado como rotor. Estos drones se pueden clasificar en tipo helicóptero, tipo ciclogiro y tipo autogiro, dependiendo de la disposición y configuración de sus rotores (Cuerno et al., 2016). Sus principales características son:

- Despegue y aterrice en vertical, disminuyendo la necesidad de espacio.
- Vuelo estacionario útil para trabajos que se requieran de precisión y exactitud.
- Alta maniobrabilidad y precisión de vuelo, debido a que estos aparatos siguen trayectorias curvilíneas, pudiendo volar en ciertos casos en cualquier trayectoria en las 3 dimensiones (García, 2015).

En la figura 3 se observa los diferentes tipos de modelos de aparatos de ala rotatoria.





Figura 3. Modelos de DRON de ala rotatoria.

Fuente: Prometec, 2021.

3.5.2 Aparatos con ala fija

Este tipo de aeronave tiene siempre despliegue horizontal, en función de la geometría de sus alas se tiene diferentes diseños: convencional (canard), ala volante o delta (joined wing, box-wing, blended-wing-body), rectangular o trapezoidal, con o sin flecha, ala alta, ala media o ala baja (Cuerno et al., 2016). Son considerados como aviones y entre sus principales características se destacan:

- Mayor eficiencia que los multirrotores, ya que, a igualdad de tamaño, tienen mayor autonomía.
- Mayor velocidad de vuelo, por lo que al tener además mayor autonomía cubren mayor superficie, siendo más útiles en la cartografía o teledetección.
- Tienen menor huella sonora, siendo los más indicados para operaciones de vigilancia.
- Tienen mayor rango meteorológico, en términos de lluvia, viento y temperatura (García, 2015).

En la figura 4 se observa los diferentes tipos de modelos de aparatos de ala fija, y su relación en tamaño a los de ala rotatoria.

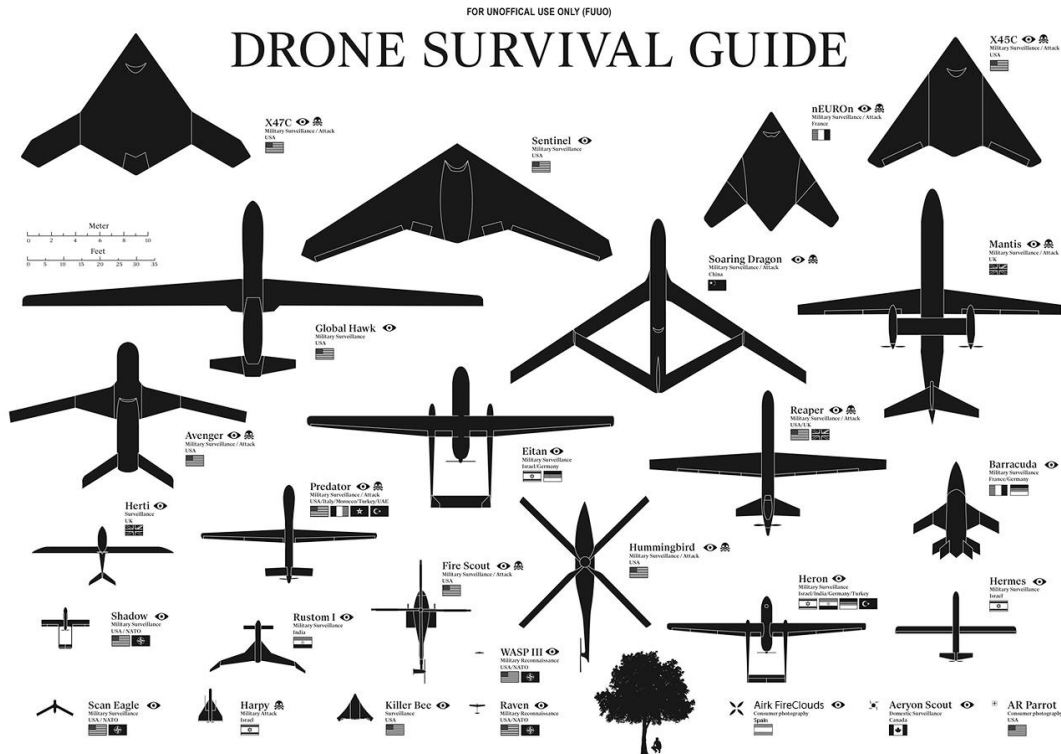


Figura 4. Modelos de DRON de ala fija.

Fuente: e-deon.net, 2016.

3.6 Imágenes procedentes de un dron y sus ventajas

3.6.1 Usos y ventajas de imágenes capturadas por un dron

El uso de drones para la captura de imágenes presenta varias ventajas para el usuario como puede ser, un incremento de la producción en base a métodos más tradicionales, un bajo coste, disminución del tiempo que se toma en adquirir los datos, alta resolución debido a la capacidad para volar a baja altura, permitiendo la adquisición de imágenes con una gran resolución, por último, la disminución de riesgo e impacto ambiental (García, 2015).

Una de las principales áreas donde se puede aplicar los drones es en la agricultura debido a que el agricultor puede ser capaz de observar su cosecha desde el aire mejorando su perspectiva, ayudando a mejorar sus problemas de riego, variaciones de tierra e infestaciones de plagas. Además, el uso de imágenes multispectrales permite obtener información donde se destaque la diferencia entre plantas sanas y enfermas (García, 2015). En la figura 5 se observa la configuración de un sistema de agricultura de precisión.

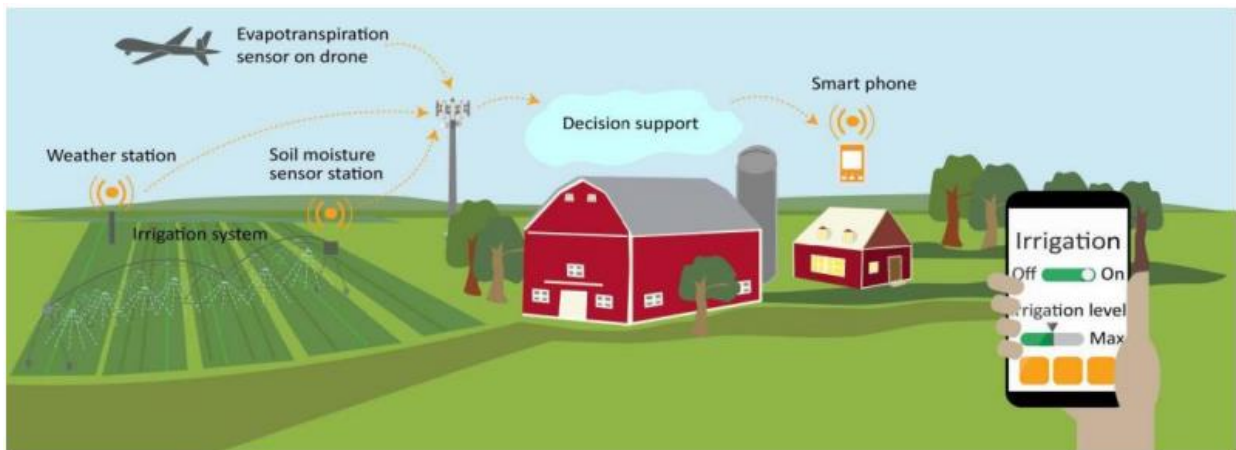


Figura 5. Esquema de un sistema de agricultura de precisión.

Fuente: U.S. Government Accountability Office, 2019.

Otra área que se ha visto afectada positivamente por esta tecnología es la topografía debido al uso de fotogrametría digital que permite, gracias a la elevada precisión que ofrece, una identificación certera de los detalles topográficos de una zona, la digitalización de polígonos y su fácil georreferenciación. Permite realizar un análisis más detallado de los elementos que conforman el plano cartográfico (Sedano & Pari, 2019)

3.6.2 Tipos de imágenes digitales



Las características fundamentales de las imágenes que se debe tener en cuenta al momento de realizar un trabajo a partir de fotografías aéreas son:

- Resolución espacial: referido al tamaño del objeto más pequeño que puede ser observado en una imagen producida por un sensor remoto. Imágenes aéreas procedentes de drones pueden llegar a alcanzar resoluciones sub métricas (1-6 cm / Pixel) (De Castro et al., 2012). Sin embargo, las imágenes multiespectrales provenientes de satélites que cuentan con la mayor resolución espacial son los satélites Geo-Eyes (1,64 m / Pixel) y Quickbird (2,4 m / Pixel) (García, 2015).
- La resolución espectral: se refiere a la habilidad de los sistemas de percepción de diferenciar y distinguir entre la radiación electromagnética de distintas longitudes de onda, básicamente, en anchura y número de las bandas espectrales que pueden discriminar el sensor. A mayor resolución espectral, mayor será la utilidad de la información adquirida (García, 2015). Respecto a resoluciones espectrales podemos distinguir entre imágenes:
 - Multiespectrales: generalmente capturan información entre 3 y 7 bandas, de 100 nm de ancho.
 - Hiperespectrales: adquieren información en varias decenas o centenas de bandas estrechas, con longitud de ondas inferiores a 5 nm de ancho.
- Frecuencia de cobertura: llamada también resolución temporal, se trata de la medida acerca de cada cuanto tiempo está disponible un sistema de percepción remota, para recoger información de una zona o área específica (García, 2015).



3.6.3 Formato de la imagen digital

Es importante mencionar que más allá del dron que se use para el sobrevuelo, lo más fundamental es el sensor y/o cámara que captura los datos, además del software que los procesa (Lozano, 2021). Las imágenes se crean cuantificando una señal eléctrica analógica, en un proceso conocido como conversión analógico - digital (A - D). La energía electromagnética que ingresa en el sensor montado al dron, se divide en múltiples bandas espectrales, según el rango de longitud de onda se dirige a un detector específico y la respuesta eléctrica de cada detector es una señal analógica continua (Tang & Shao, 2015).

La imagen digital es considerada como una imagen en bruto, tal como normalmente llega al usuario final, consiste en un conjunto de matrices, una por cada canal del sensor, en la que aparecen números del 0 al 255. El cero indica que no llega nada de radiación desde ese punto y el 255 que llega el valor más alto de radiación, estos valores se denominan Niveles Digitales (Chuvieco, 2000). Cada píxel posee valores numéricos enteros que representan la radiancia detectada para cada banda espectral, los ND visualizados generalmente en niveles de intensidad de color (Arozarena et al., 2016).

Esta información es de gran relevancia en aplicaciones medioambientales ya que permite adquirir datos como el índice de crecimiento, salud general de una planta, índice de suelo ajustado, entre otras (Cristancho, 2020; Daughtry, 2000). El proceso para la adquisición de las imágenes, es similar al vuelo fotográfico en cuanto a los aspectos relativos a la posterior corrección geométrica de las imágenes y generación de mosaicos.

3.7 Estado del Arte



Uno de los primeros estudios relacionados al uso de técnicas de teledetección para determinar contaminación atmosférica fue el estudio realizado por (Sifakis, 1992) *“Mapping of Air Pollution Using SPOT Satellite Data”* en cual utiliza un satélite SPOT con el fin de realizar un mapa que indique la distribución horizontal de los contaminantes aéreos a través de la utilización de imágenes de alta resolución; en el estudio se obtuvieron imágenes de la ciudad de Toulouse, en Francia. A través de técnicas de preprocesamiento se logró obtener una visión general de los fenómenos de contaminación en el área, las cuales pueden resultar útiles para análisis ambientales (Sifakis, 1992). En el estudio también se destaca la importancia y la necesidad de más investigaciones de este tipo para tener una idea general acerca de la contaminación atmosférica y poder tomar planes de acción con la información obtenida.

Actualmente en Latinoamérica se han desarrollado novedosos estudios respecto al tema de contaminantes atmosféricos a partir de comienzos del año 2000, sobre todo en grandes ciudades como Córdoba - Argentina, Cali - Colombia, Lima - Perú, entre otras (Céspedes & Cuero, 2015; Della, 2018; Rojas, 2018). El uso de sensores remotos permite obtener información de cualquier objeto sin tener contacto directo, al aplicar modelos matemáticos a las imágenes se obtiene información correspondiente a los diversos contaminantes atmosféricos y su dispersión en la zona de interés, en general se determinan las variaciones espaciales de las zonas con mayor presencia de emisión, lo que permite tomar medidas de acción para dar solución a los problemas asociados con este tipo de polución (Céspedes & Cuero, 2015).

A nivel local en la ciudad de Cuenca - Ecuador se han realizado varios estudios acerca del uso de satélites (sensores remotos) para determinar contaminantes atmosféricos, uno de los más recientes es el estudio titulado *“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”* (Abad, 2016). El estudio tiene como base que en la ciudad de Cuenca se genera



una gran cantidad de emisiones de contaminantes atmosféricos y debido a la falta de información no se puede tener una idea de cómo estos afectan al medio ambiente. Para el estudio se utilizó imágenes multiespectrales obtenidas del satélite Landsat 8 y a través del procesamiento de las mismas se obtuvo una ecuación empírica para determinar la concentración de PM_{10} y determinar zonas donde los niveles de este contaminante resulten perjudiciales para la salud de las personas y animales (Abad, 2016). Se destaca que para futuros estudios se pretenderá determinar un mayor número de contaminantes atmosféricos como: PM_{10} , $PM_{2.5}$, CO_2 , CO , NO_x , SO_x y O_3 ; a través de la aplicación de sensores remotos y de este modo determinar el efecto en la Vegetación Urbana de Cuenca. De igual relevancia el estudio realizado por Criollo (2019) titulado *“Valoración de la concentración de dióxido de nitrógeno atmosférico (NO_2) en el área urbana de la ciudad de Cuenca a través de imágenes satelitales”* en el cuál a partir de imágenes satelitales obtenidas de Landsat OLI 8 y Landsat ETM+7 se obtuvo un modelo matemático con un $R^2=0,78$ que predice significativamente los valores de concentración de NO_2 .

Por último, el estudio realizado por Vásquez & Arboleda (2021) titulado *“Evaluación de datos satelitales del sensor de calidad de aire TROPOMI - SENTINEL 5P para el Ecuador entre los años 2018 a 2020”*, el estudio señala la comparativa entre las mediciones adquiridas por el sensor TROPOMI a bordo del Sentinel 5P y las mediciones de la REMMAQ en la ciudad de Quito-Ecuador, en el lapso de tiempo entre agosto del 2018 a diciembre del 2020. Para encontrar la relación entre los datos satelitales y los de tierra se realizó una correlación de las variables (datos contaminantes satélites y datos contaminantes estación en tierra), donde se evidenció que existe una correlación estadísticamente significativa, evidenciando de esta manera que es posible utilizar datos satelitales para determinar la calidad de aire de una zona a gran escala, sin necesidad de recurrir a estaciones en tierra. Pese a existir varios estudios a partir de diversos productos satelitales, a la fecha no se ha realizado un estudio el cuál se considere una resolución espacial más detallada, cómo sería el caso de productos obtenidos a través de cámaras multiespectrales montadas en un dron, con el cuál

el valor de pixel llega a representar de 1 a 5 cm, mientras que en productos satelitales el valor de píxel representa de 10 a 50 metros.

A continuación, en la tabla 1 se presenta un resumen de las principales características de los diferentes satélites utilizados para la determinación de concentraciones de contaminantes atmosféricos en la actualidad, se detallan aspectos importantes como su resolución espacial, resolución temporal y sus unidades de medida.

Tabla 1. Características de cada satélite y sus formas de medición.

Fuente: (EarthDATA NASA, 2021)

Satélite	Contaminante medido	Sensor-modelo	Resolución espacial	Resolución temporal	Unidades
Sentinel 5P	CO, SO ₂ , NO ₂ , O ₃ , CH ₂ O	Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI)	1 km ²	30 minutos	mol/m ²
MERRA-2	CO	CO Column Burden (ENSEMBLE) (M2TMNXCH M v5.12.4)	0,5° x 0,625° ≈ 60 km ²	30 días	kg/m ²
	SO ₂	MERRA 2 Model SO2 Column Mass Density (ENSEMBLE)	0,5° x 0,625° ≈ 60 km ²	30 días	kg/m ²



Satélite	Contaminante medido	Sensor-modelo	Resolución espacial	Resolución temporal	Unidades
		(M2TMNXAER v5.12.4)			
	O ₃	Total column ozone (M2TMNXSLV v5.12.4)	0,5° x 0,625°	30 días	DU=Unidades Dobsons (2.69 × 10 ²⁰ moléculas/m ²)
OMI	NO ₂	NO2 Tropospheric Column (30 % Cloud Screened)	0,25° x 0,25° ≈ 25km ²	1 día	1/cm ²
	CH ₂ O	HCHO column amount (OMHCHOd v003)	0.1°x 0.1° ≈ 10 km ²	1 día	moléculas/cm ²
AIRS	O ₃	Ozone Total Column (Daytime/Ascending, AIRS-only) (AIRS3STM v7.0)	1x1° ≈ 100 km ²	30 días	DU=Unidades Dobsons (2.69 × 10 ²⁰ moléculas/m ²)

4. Materiales y Métodos

4.1 Diseño de la investigación

El presente estudio es de tipo exploratorio y correlacional, ya que pretende validar una nueva metodología para la obtención de concentración de $PM_{2.5}$, en base a datos multispectrales procedentes de 2 cámaras, de la marca Survey, obtenidos a través del montaje en *drón*. Para lo cual se realizará una correlación de las variables que comprueben su interacción con el fin de ser aplicados en la ciudad de Cuenca.

Este supuesto se basa en un análisis deductivo, en el cual a través de datos cuantitativos se determina la correlación que existen entre los datos de niveles digitales de las bandas de las cámaras (Red, Green, Blue y NIR) para generar modelos de regresión lineal múltiple con el fin de estimar la concentración de $PM_{2.5}$.

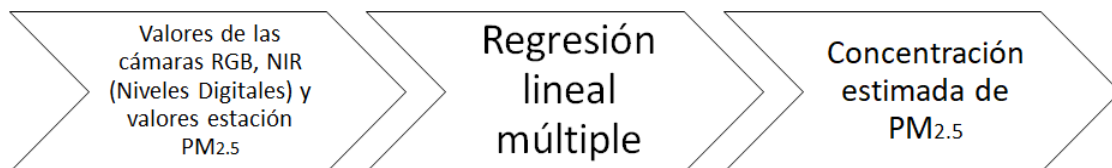


Ilustración 1. Modelo de investigación.

Fuente: Autoría propia.

Para describir la metodología a detalle, se ha dividido en secciones, en las cuales se describe el área de estudio, las fuentes y formas de recopilación de la información necesaria para el análisis, el procesamiento de las imágenes fotogramétricas, la construcción de la base de datos, la obtención del modelo de regresión lineal múltiple y la validación de modelo obtenido.



4.2 Área de estudio

La ciudad de Cuenca se encuentra ubicada al sur del Ecuador, en la cordillera andina occidental, localizada entre las coordenadas 9688009,16m – 9675644,86 m de longitud y 714638,65 m – 734424,42 m de latitud, una altura promedio de 2 550 metros sobre el nivel del mar (msnm). Tiene un clima templado en promedio de 15 °C, una pluviosidad anual de 700 a 1 100 mm y 75 % de humedad relativa, la velocidad media del viento varía entre 4 m/s y 5,5 m/s (Palacios & Espinoza, 2014; EMOV-EP, 2012). Se encuentra catalogada como la tercera ciudad más importante del país, con una población de 505 585 habitantes (INEC, 2010). Entre las principales características urbanas de la ciudad de Cuenca que modifican la calidad del aire tenemos: usos de suelos, densidad urbana, ubicación de las fuentes puntuales de emisión (industrias y gasolineras) y el elevado tráfico vehicular (Jerves & Armijos–Arcos, 2016).

La ciudad de Cuenca cuenta con 3 estaciones de monitoreo continuo dentro del casco urbano, la primera de ellas localizada en el centro histórico de la ciudad (codificación: MUN, por estar ubicada sobre la edificación de las oficinas de la municipalidad), una segunda estación localizada en el sector del parque industrial, al norte de la ciudad (codificación: CCA, por estar ubicada sobre la edificación del Colegio Carlos Arizaga, el cual está a una distancia de alrededor de 300 metros del área industrial), por último tenemos la estación ubicada en la Av. Loja y calle Ignacio Roca, sector sur de la ciudad (codificación: EIE, por estar ubicada sobre la edificación de la escuela Ignacio Escandón) (EMOV EP, 2019).

La importancia de la estación CCA se debe a que en la zona urbana de Cuenca el tráfico vehicular es la fuente principal de emisión, adicionalmente al noroccidente de esta, se destaca el importante aporte de las emisiones industriales. La estación mide los siguientes contaminantes atmosféricos: O₃, NO₂, SO₂, PS (Partículas Sedimentables), BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xilenos, son compuestos orgánicos volátiles), PM₁₀ y PM_{2.5}. Para el año 2019 el sensor automático de PM_{2.5} de la estación CCA tuvo una cobertura de 100 % (EMOV EP, 2019). A continuación, en la figura 6 se observa la ubicación de la estación CCA dentro de la ciudad de Cuenca.

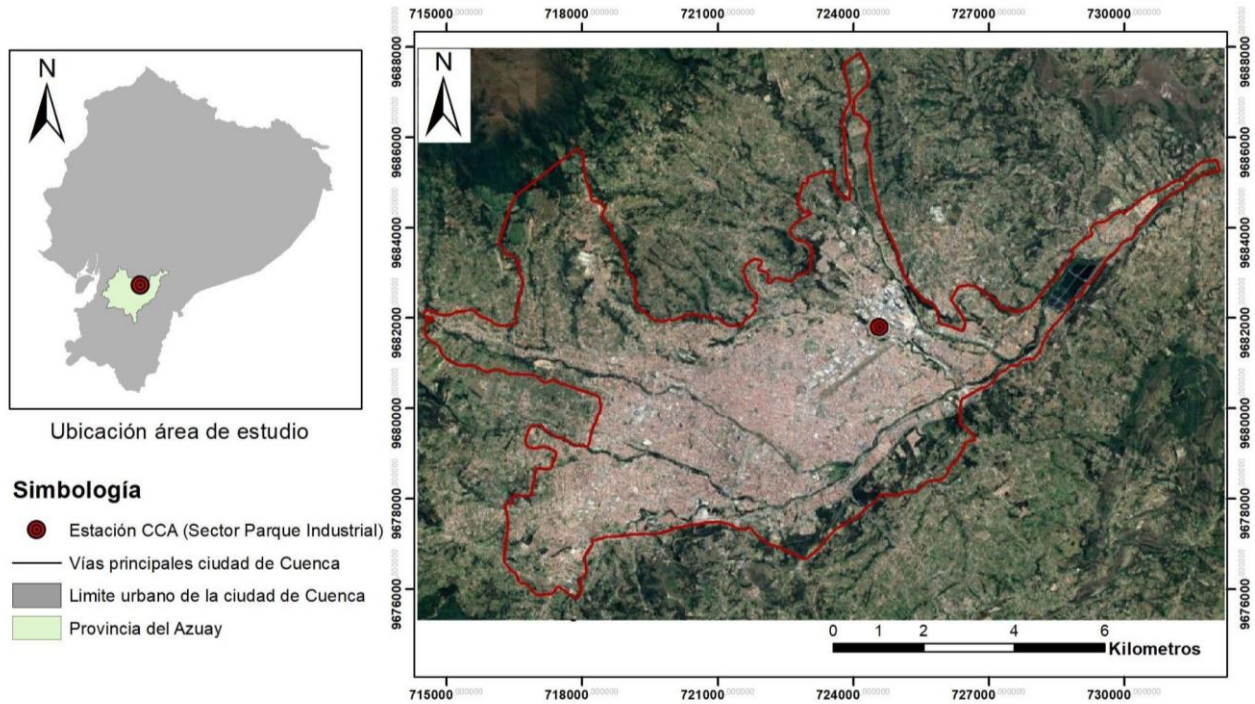


Figura 6. Mapa de Área de Estudio; CCA representa una estación de monitoreo continuo de PM_{2.5}.

Fuente: Autoría propia.

La tabla 2 indica las coordenadas geográficas en la que se encuentra localizada la estación de monitoreo continuo dentro del colegio Carlos Arizaga (CCA).

Tabla 2. Coordenadas estación de monitoreo continuo.

Estación	Coordenada en X	Coordenada Y
CCA	724524.98 m E	9681477.56 m S

4.3 Esquema de procesos

A continuación, en la ilustración 2 se presenta todos los procesos que se llevaron a cabo para la realización del presente estudio.

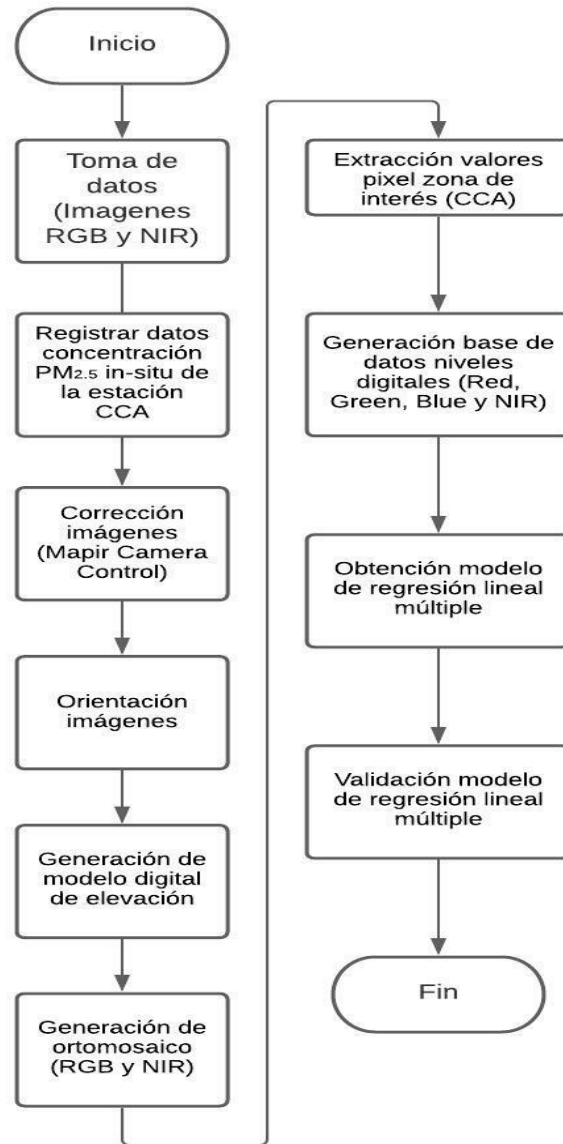


Ilustración 2. Esquema general del proceso.

Fuente: Autoría propia.



4.4 Obtención de fotografías multiespectrales de la zona industrial de la ciudad de Cuenca

4.4.1 Materiales y equipos utilizados para la recopilación de información

DRON: Se empleó el modelo Phantom 4 Pro (P4P) de la marca DJI, el cual tiene un tiempo de vuelo estimado de 30 minutos / batería y una distancia de transmisión máxima de 6,9 Km (DJI, 2020).

Cámaras multiespectrales: Se utilizó 2 cámaras modelo Survey 3W de la marca MAPIR, una con un sensor RGB cuya longitud de onda va desde los 375 nm a 650 nm y otra con un sensor NIR (Infrarrojo cercano) cuya longitud de onda es de 850 nm. Ambas poseen un receptor GPS USB externo para etiquetar automáticamente cada imagen capturada. Su sensor de 12MP y su lente nítido permiten capturar fácilmente medios aéreos (MAPIR, 2020).

Software: QGIS 3.2.3, Agisoft PhotoScan, el lenguaje R 4.0.1 [RZ1] y su interfaz R Studio 4.0.1. InfoStat (Versión Libre), MiniTab (Trial 30 días). Pix4d Capture.

4.4.2 Calibración de equipos

En primera instancia se realiza la calibración del DRON a emplear, y la revisión de sus sistemas subsecuentes. En la figura 7 se observa la calibración de sus sensores, los cuales permiten el correcto funcionamiento del sistema anti colisión, detectando obstáculos a menos de 3 metros de distancia, de este modo se puede evitar potenciales colisiones. En la figura 8 se observa la calibración de su giroscopio, este detecta cambios en los atributos de rotación como cabeceo y balanceo, además que es indispensable para su correcta geolocalización.

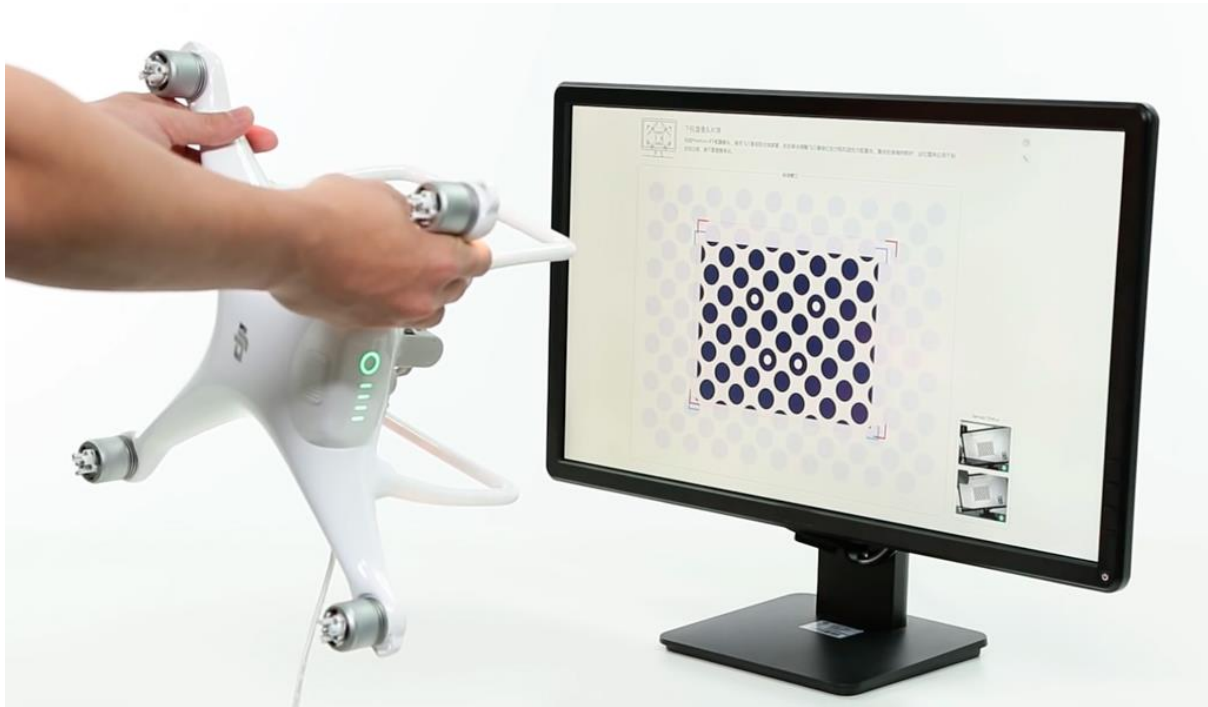


Figura 7. Calibración de sensores, DRON DJI Phantom 4 pro.

Fuente: Calibrar los sensores de visión en el Phantom 4 para corregir errores, 2019.



Figura 8. Calibración de giroscopio/brújula, DRON DJI Phantom 4 pro.

Fuente: Cómo volar un dron: guía práctica, 2016.

En el caso de las cámaras multispectrales Survey 3W, se ajustaron en el DRON P4P utilizando una placa de montaje plástica, sin interferir con el funcionamiento ni su óptica original. Las imágenes se capturan a intervalos de 2 segundos, velocidad de obturación 1/500 e ISO:200 para cámara RGB, velocidad de obturación 1/500 e ISO:400 para cámara NIR. Para determinar si los valores capturados son correctos se procede a calibrar las imágenes en el software *Mapir Camera Control*, en el cual se usó la calibración predeterminada, esta contiene información de un objetivo medido en un laboratorio con un espectrómetro. En la figura 9 y 10 se observa las condiciones dadas para la calibración de la imágenes RGB y NIR respectivamente.

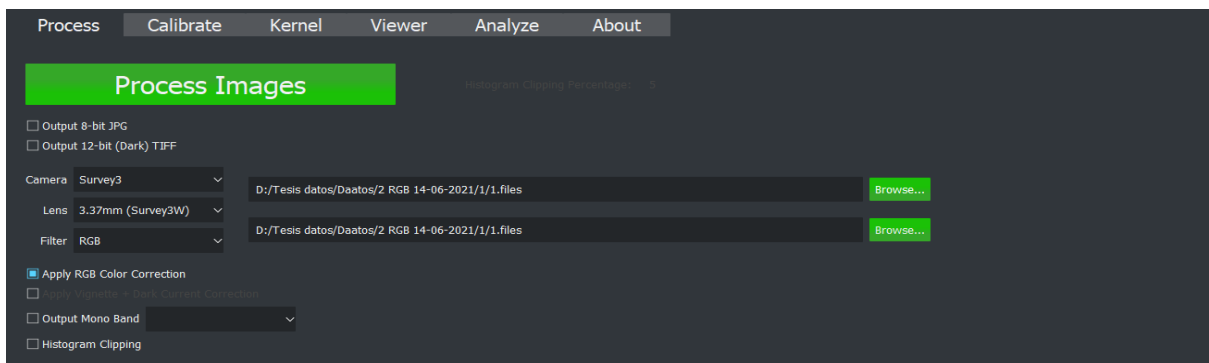


Figura 9. Condiciones para la calibración de imágenes RGB en programa MAPIR.

Fuente: Autoría propia.

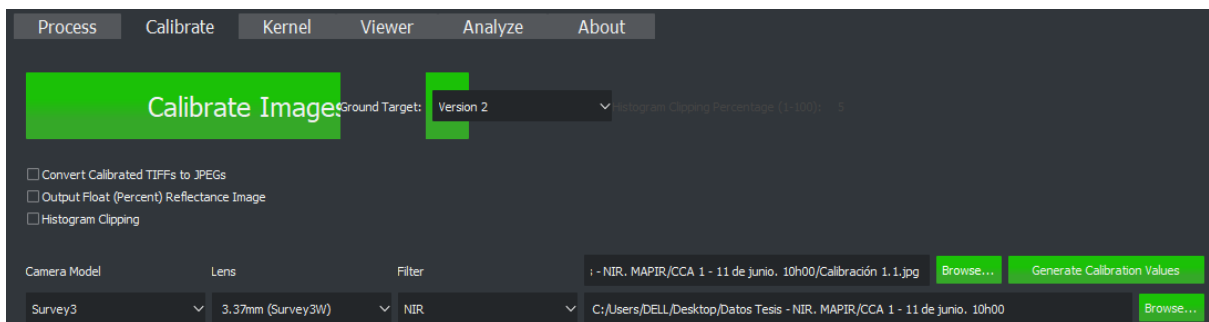


Figura 10. Condiciones para la calibración de imágenes NIR en programa MAPIR.

Fuente: Autoría propia.



4.4.3 Campaña para la toma de datos

Se realizará 50 planes de vuelo, los cuales cubren un área de aproximadamente 5 hectáreas alrededor de la estación CCA, misma zona que fue punto de partida y aterrizaje de cada uno de los planes de vuelo. Las imágenes multiespectrales / datos se recolectarán en un periodo de tiempo de 30 días aproximadamente. Cabe especificar que se tomaron de 3 a 5 muestras diarias a partir de las 9:00 am hasta las 13:00 pm, en intervalos de 60 minutos, dependiendo de las condiciones climáticas, debido a que la presencia de lluvia o fuertes ráfagas de viento que ponen en peligro la integridad del dron.

4.5 Procesamiento de las imágenes multiespectrales, fotogrametría

4.5.1 Procesamiento de imágenes

Para obtener las fotografías aéreas se hizo uso del dron P4P y las 2 cámaras anteriormente mencionadas, el dron se controla de forma remota a través de la aplicación para celular *Pix4D capture*, la cual permite realizar planes de vuelo. Para el proyecto se realizó un plan de vuelo que incluye un área de aproximadamente 5 hectáreas. Además, la configuración utilizada para el plan de vuelo fue: velocidad de vuelo del dron de 6 m/s, traslape vertical 70 % y traslape horizontal 65 %, altura de vuelo: 60 m. En la figura 11 se observa la configuración utilizada dentro de la aplicación mencionada.



Figura 11. Plan de vuelo para la toma de fotografías aéreas.

Fuente: Autoría propia.

Para este estudio se tomarán como datos los ND de cada banda de las cámaras RGB y NIR, no se realiza la transformación de estos valores en radiancia y por ende tampoco en reflectancia, ya que estos procesos se lo realizan en imágenes satelitales por la interferencia de la atmósfera y el campo electromagnético de la tierra. En el caso del estudio no se presentan estas interferencias debido a que el vuelo para la toma de datos es a 60m de altura (Aguilar et al., 2015).

4.5.2 Fotogrametría

Una vez obtenida las imágenes a través de las cámaras RGB y NIR, estas fueron procesadas mediante el programa Agisoft Metashape Professional 1.5.2, con el fin de unificarlas en una ortofotografía y convertirla a formato tif, es decir los datos de cada imagen o DN (nivel digital) se unifican en una sola. Posteriormente en el software Qgis las imágenes fueron divididas en sus 4 bandas R (Red: 0,66 μm), G (Green: 0,56 μm), B (Blue: 0,5 μm), NIR (Infrarrojo Cercano: > 0,7 μm).

En las siguientes figuras se observa las condiciones dadas dentro del programa *Agisoft Metashape Professional 1.5.2* para la obtención de las ortofotografías de mejor calidad, teniendo en consideración el equipo computacional con el que se cuenta. En primer lugar, la orientación de fotografías se especifica con una precisión Alta, esta consiste en georreferenciar cada fotografía individual y en ubicar el mayor número de puntos coincidentes dentro de fotografías que se encuentran en el rango de traslape determinado previamente. A continuación, en la figura 12 se observa las condiciones dadas dentro de la orientación de fotografías.

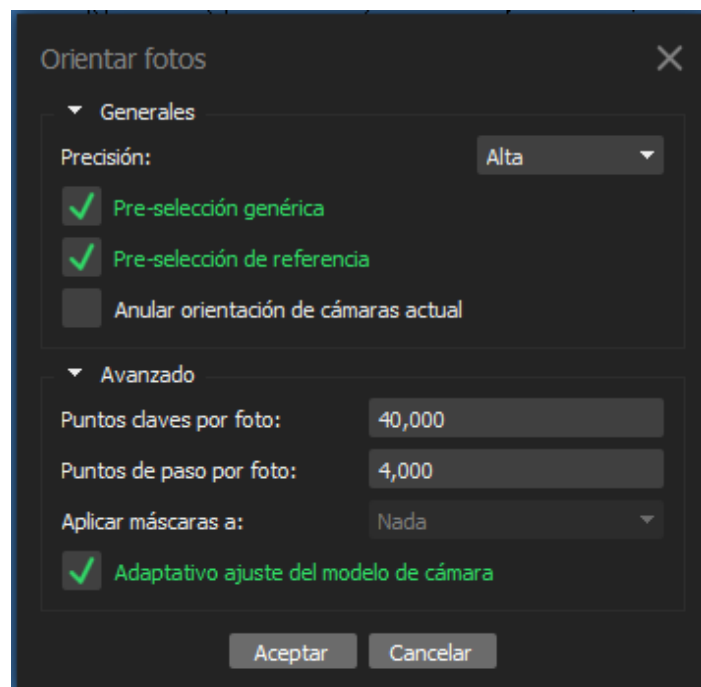


Figura 12. Condiciones para orientar fotografías.

Fuente: Autoría propia.

El segundo procedimiento consiste en la eliminación manual de fotografías con gran potencial de generar interferencias o errores, ya que han sido capturadas a diferentes alturas durante el inicio y fin del plan de vuelo respectivo. En la figura 13 y 14 se visualiza a mayor detalle el procedimiento.

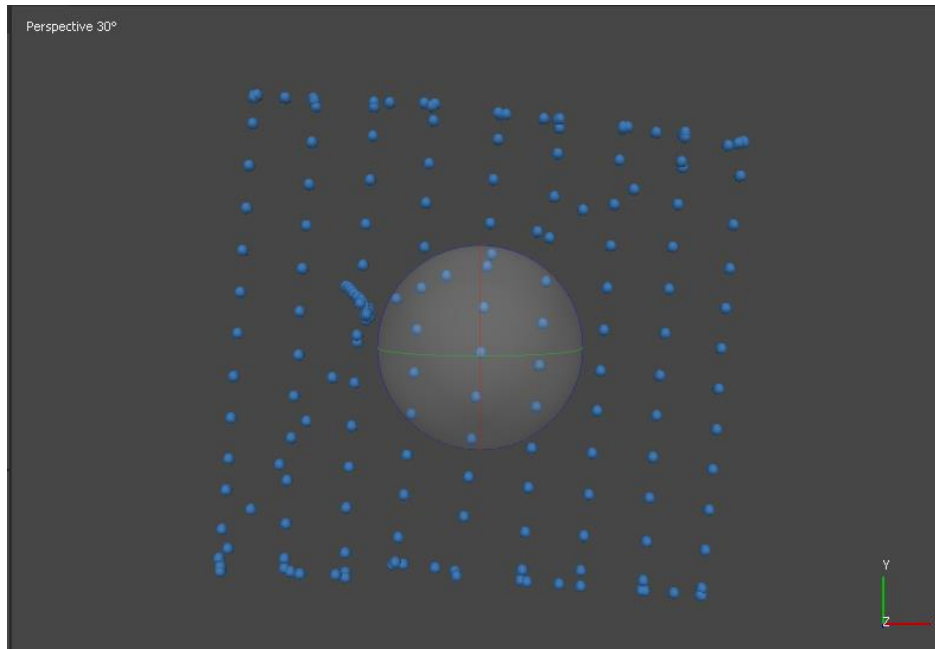


Figura 13. Vista superior de todo el conjunto de fotografías.

Fuente: Autoría propia.

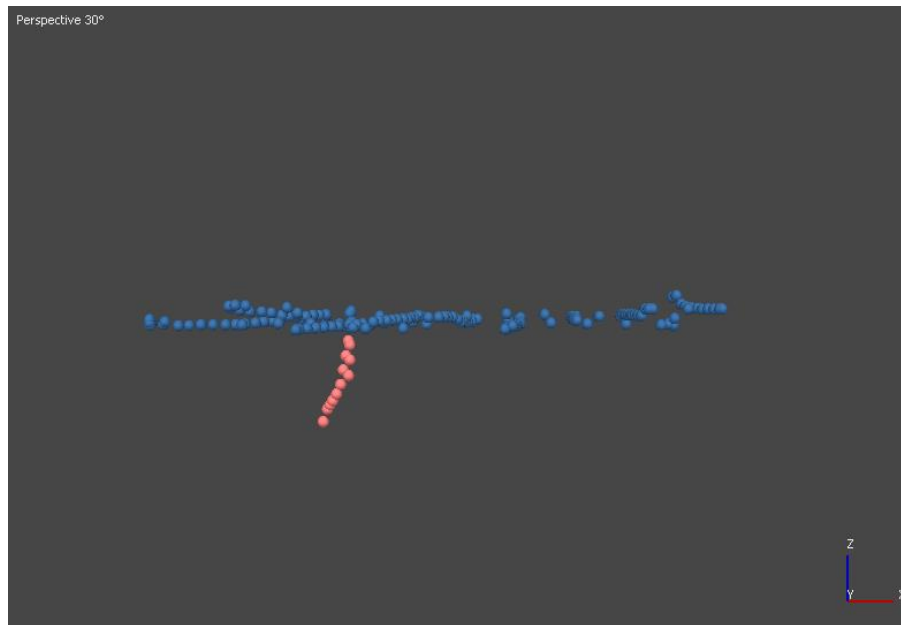


Figura 14. Vista lateral y eliminación de fotografías con potencial de generar error.

Fuente: Autoría propia.

El tercer procedimiento es la creación de la nube de puntos densa, la cual permite generar y visualizar un modelo preliminar, con base en las posiciones estimadas de cada fotografía el programa calcula la información de profundidad para la combinación en un solo punto de enturbiamiento denso. En la figura 15 se observa a detalle las condiciones del procedimiento.

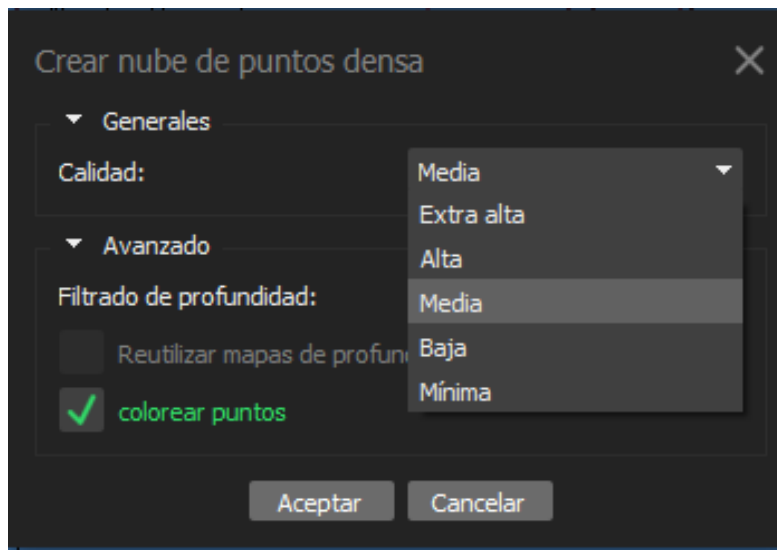


Figura 15. Condiciones para creación de la nube de puntos.

Fuente: Autoría propia.

El cuarto procedimiento corresponde a la creación del modelo digital de elevaciones (MDE), este se define en la proyección WGS 84 / UTM Zone 17 S (EPSG::32717). El MDE puede usar como su fuente de creación la nube de puntos densa o una nube de puntos dispersa. En la figura 16 se observa a detalle las condiciones del procedimiento.

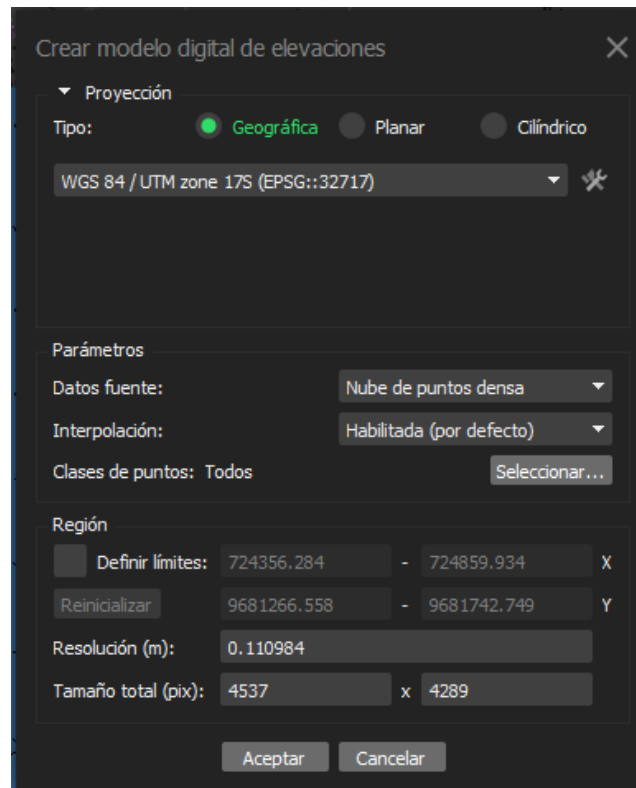


Figura 16. Condiciones para la creación de MDE.

Fuente: Autoría propia.

Como quinto procedimiento está la creación del ortomosaico, para el caso de estudio se cuenta con un tamaño de píxel de alrededor de 3 cm, el ortomosaico basa su creación en el modelo digital de elevaciones. Por último, se tiene la exportación del ortomosaico, en formato TIFF, el cual fue tratado posteriormente en *QGIS 3.2.3* para la extracción de ND de la zona de interés. En la figura 17 se observa a detalle las condiciones de los procedimientos.

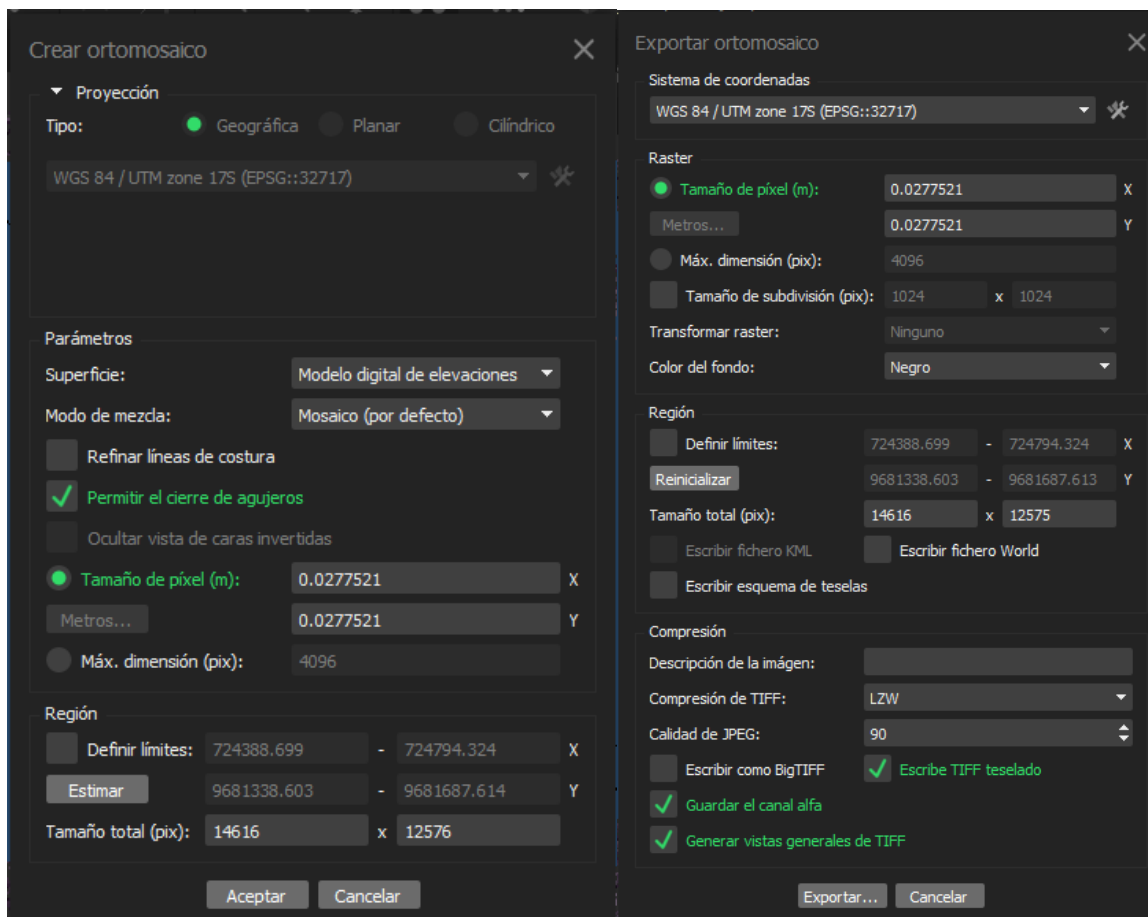


Figura 17. Condiciones para creación y exportación de ortomosaico.

Fuente: Autoría propia.

4.6 Construcción de base de datos con información cuantitativa a partir de fotografías multiespectrales y valores de la estación de monitoreo continuo

Los datos de $PM_{2.5}$ se obtuvieron de la estación de monitoreo continuo, la cual funciona las 24 horas del día (Alcaldía de Cuenca & Red de Monitoreo EMOV EP., 2012). La estación de monitoreo se encuentra ubicada en el colegio Carlos Arizaga, a 300m de distancia del área industrial de la ciudad de Cuenca, como se observa en la Figura 6. Respecto al contaminante de interés, éste es registrado cada hora, los valores de concentración del contaminante

fueron adquiridos al instante de la página oficial de la EMOV EP referente a calidad del aire. Respecto a las ortofotografías se cuenta con un total de 100 imágenes multiespectrales / datos (50 con propiedades RGB y 50 con propiedades NIR) obtenidas a partir del mismo número de planes de vuelo del DRON, la cual cubre la zona de interés y la estación de monitoreo continuo.

Para extraer el valor del píxel de interés, se utilizó el software *QGIS 3.2.3* y el complemento / herramienta *Point Sample Tool*, el cual extrae los valores de un archivo shape tipo punto ubicado sobre la zona de interés de las ortofotos ya procesadas, en este caso la estación de monitoreo continuo de $PM_{2.5}$ (CCA). El punto utilizado fue ubicado en las siguientes coordenadas: 724567.875 m y 9681441.000 m. Posteriormente los valores extraídos se organizaron en una matriz en el software Excel, donde se presentan los valores de ND de las bandas Red, Green, Blue y NIR y la concentración de $PM_{2.5}$ (estación CCA), de acuerdo al orden en que se realizaron los planes de vuelo, con el fin de comparar dichas variables.

De este modo generar un modelo matemático, regresión lineal múltiple, para obtener la concentración de $PM_{2.5}$ sin la necesidad de la estación en tierra. A continuación, en la tabla 3 se detalla la fecha y la frecuencia horaria con la que fue adquirido cada uno de los datos empleados en el estudio a partir del 11 de junio al 29 de junio del año 2021, además de la concentración detectada por la estación CCA (unidad de medida $\mu g/m^3$) y sus correspondientes valores de ND para cada una de las bandas de estudio.

Tabla 3. datos para modelos de regresión: Concentración $PM_{2.5}$ y valores de ND.

Fuente: Autoría propia

Fecha	Hora	$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$) Estación CCA	Valor ND banda Red	Valor ND banda Green	Valor ND banda Blue	Valor ND banda NIR
Viernes 11 de junio	10:00	17	88	57	80	87



Fecha	Hora	PM_{2.5} (µg/m³) Estación CCA	Valor ND banda Red	Valor ND banda Green	Valor ND banda Blue	Valor ND banda NIR
Viernes 11 de junio	11:00	2	245	224	207	128
Viernes 11 de junio	12:00	5	167	132	122	66
Viernes 11 de junio	13:00	4	168	146	137	89
Lunes 14 de junio	9:00	13	86	56	69	22
Lunes 14 de junio	10:00	11	156	130	113	37
Lunes 14 de junio	11:00	10	222	194	181	70
Lunes 14 de junio	12:00	8	160	123	135	98
Lunes 14 de junio	13:00	4	254	241	250	107
Martes 15 de junio	9:00	9	131	105	102	35
Martes 15 de junio	10:00	10	195	167	154	110
Martes 15 de junio	11:00	6	250	234	245	94



Fecha	Hora	PM_{2.5} (µg/m³) Estación CCA	Valor ND banda Red	Valor ND banda Green	Valor ND banda Blue	Valor ND banda NIR
Martes 15 de junio	12:00	3	175	149	138	78
Martes 15 de junio	13:00	3	179	165	157	123
Lunes 21 de junio	9:00	13	169	150	134	68
Lunes 21 de junio	10:00	8	142	115	108	72
Lunes 21 de junio	11:00	4	134	120	98	99
Lunes 21 de junio	12:00	5	163	139	125	140
Lunes 21 de junio	13:00	4	116	105	50	32
Martes 22 de junio	9:00	11	189	165	145	82
Martes 22 de junio	10:00	15	148	128	122	22
Martes 22 de junio	11:00	3	234	193	181	94
Martes 22 de junio	12:00	2	122	104	109	118



Fecha	Hora	PM_{2.5} (µg/m³) Estación CCA	Valor ND banda Red	Valor ND banda Green	Valor ND banda Blue	Valor ND banda NIR
Martes 22 de junio	13:00	0	205	189	171	61
Miércoles 23 de junio	9:00	11	187	164	152	82
Miércoles 23 de junio	10:00	7	136	117	123	68
Miércoles 23 de junio	11:00	1	247	205	189	76
Miércoles 23 de junio	12:00	0	210	188	170	68
Miércoles 23 de junio	13:00	4	254	225	215	140
Jueves 24 de junio	9:00	18	224	192	176	84
Jueves 24 de junio	10:00	10	205	187	167	106
Jueves 24 de junio	11:00	5	253	238	251	113
Jueves 24 de junio	12:00	1	229	224	232	73
Jueves 24 de junio	13:00	2	195	172	168	91



Fecha	Hora	PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Estación CCA	Valor ND banda Red	Valor ND banda Green	Valor ND banda Blue	Valor ND banda NIR
Viernes 25 de junio	10:00	12	135	113	112	32
Viernes 25 de junio	11:00	10	128	119	42	87
Viernes 25 de junio	12:00	6	250	224	201	137
Viernes 25 de junio	13:00	6	169	142	135	87
Sábado 26 de junio	9:00	10	169	150	140	62
Sábado 26 de junio	10:00	6	166	142	136	49
Sábado 26 de junio	11:00	6	159	139	130	87
Lunes 28 de junio	9:00	8	209	172	154	125
Lunes 28 de junio	10:00	3	222	187	170	105
Lunes 28 de junio	11:00	0	171	154	136	84
Lunes 28 de junio	12:00	2	205	188	173	95



Fecha	Hora	PM _{2.5} (µg/m ³) Estación CCA	Valor ND banda Red	Valor ND banda Green	Valor ND banda Blue	Valor ND banda NIR
Lunes 28 de junio	13:00	6	156	136	137	128
Martes 29 de junio	9:00	11	147	124	115	40
Martes 29 de junio	10:00	9	180	153	143	68
Martes 29 de junio	11:00	5	191	169	169	135
Martes 29 de junio	12:00	4	253	233	210	147

4.7 Determinación de ecuación empírica para la obtención la concentración de PM_{2.5}

Se utilizaron los softwares R 4.0.1 [RZ1] y su interfaz R Studio 4.0.1, InfoStat (Versión Libre), MiniTab (Trial 30 días), para la generación de los modelos de regresión lineal múltiple. En primera instancia, se realizaron regresiones simples de cada una de las variables independientes (Red, Green, Blue, NIR) con respecto a la dependiente (PM_{2.5}) con la finalidad de verificar su tipo de distribución y comportamiento. El modelo de regresión corresponde a un modelo lineal con múltiples variables que permiten predecir o estimar la variable dependiente. Al aplicar el modelo se siguió la ecuación 1, permitiendo identificar la más apta combinación de variables entre sí



$$y = a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + \dots a_nx_n \quad (1)$$

En donde:

y = Variable dependiente.

x_n = Variables independientes o regresoras.

a_n = Constantes determinadas empíricamente.

Respecto a los modelos generados, se espera obtener el coeficiente de determinación ($R^2 > 0,5$), coeficiente de determinación ajustado ($R^2_{Adj} > 0,5$) y p-value, criterio de nivel de significancia ($p\text{-value} < 0,05$).

5. Resultados

5.1 Análisis de correlación

A través de este análisis se pretende medir el grado en el que los datos obtenidos se encuentran relacionados, consta de dos partes:

- Diagrama de dispersión: representa gráficamente la relación entre dos variables, aporta una primera impresión acerca del tipo de relación que mantienen las variables (Cristancho, 2020; Cervigón, 2015).
- Coeficiente de correlación de Pearson: dará la medida de intensidad y el sentido de la relación lineal entre dos variables (Cristancho, 2020; Cervigón, 2015).

En la figura 18, 19, 20 y 21 se representan los resultados del diagrama de dispersión de las variables independientes (Red, Green, Blue y NIR) con respecto a la variable dependiente ($PM_{2.5}$).

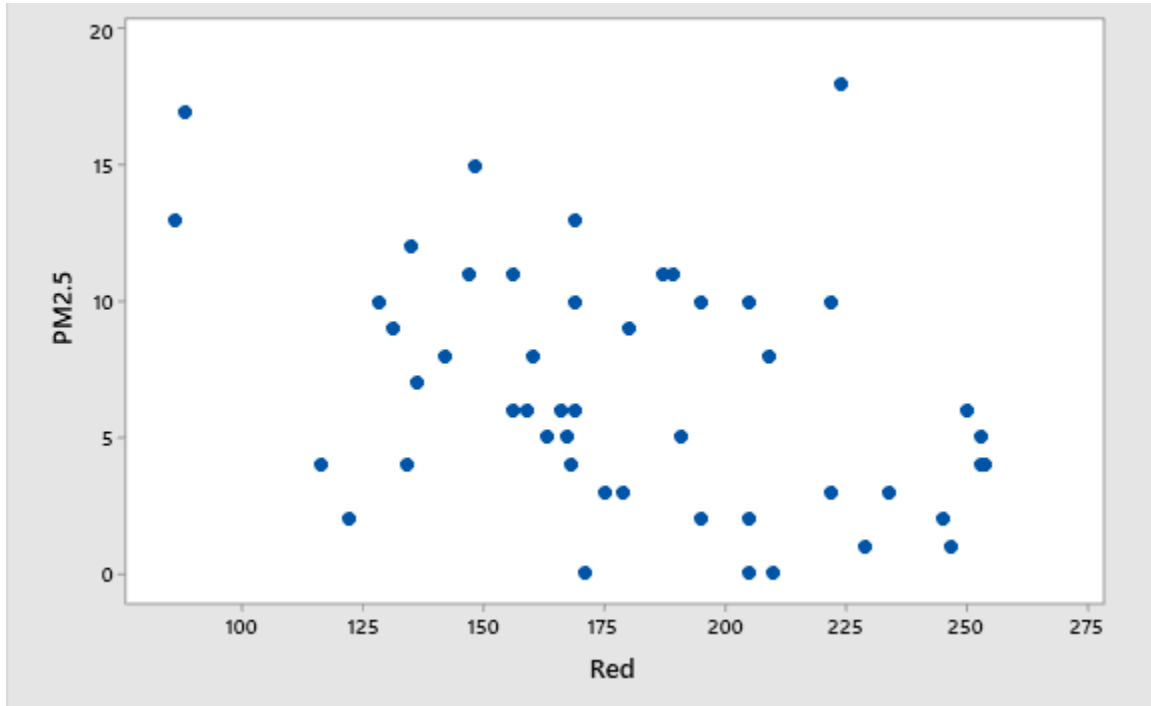


Figura 18. Diagrama de dispersión: $PM_{2.5}$ vs Red

Fuente: Autoría propia.

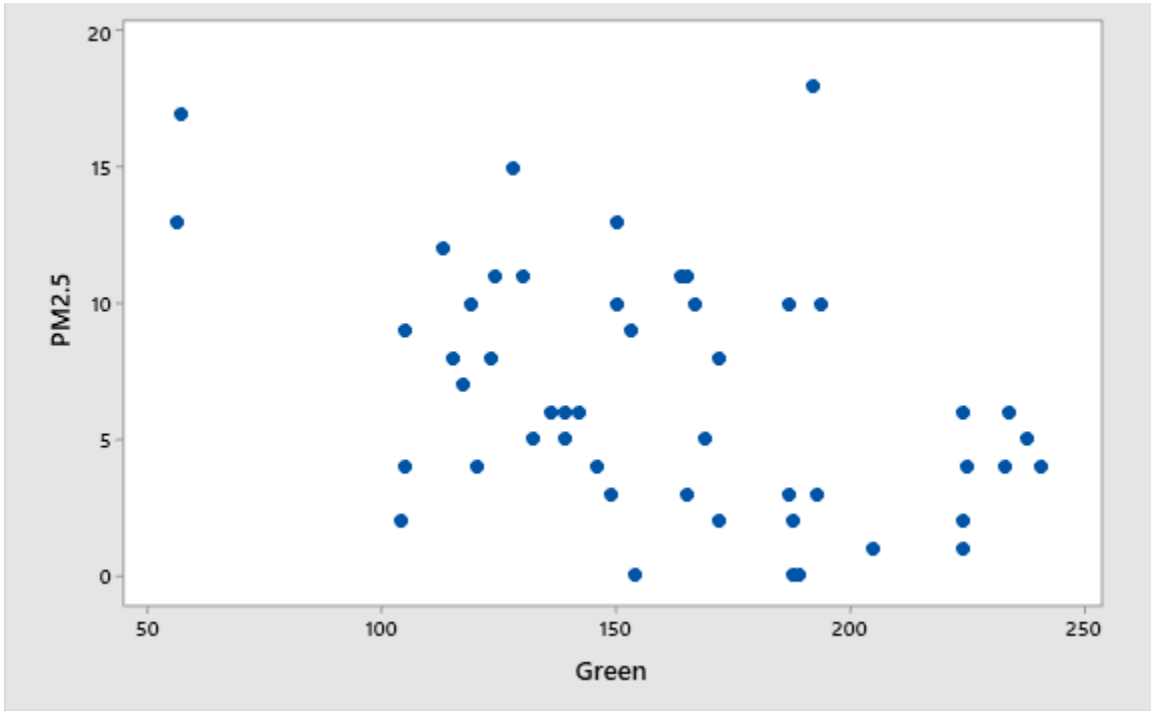


Figura 19. Diagrama de dispersión: $PM_{2.5}$ vs Green

Fuente: Autoría propia.

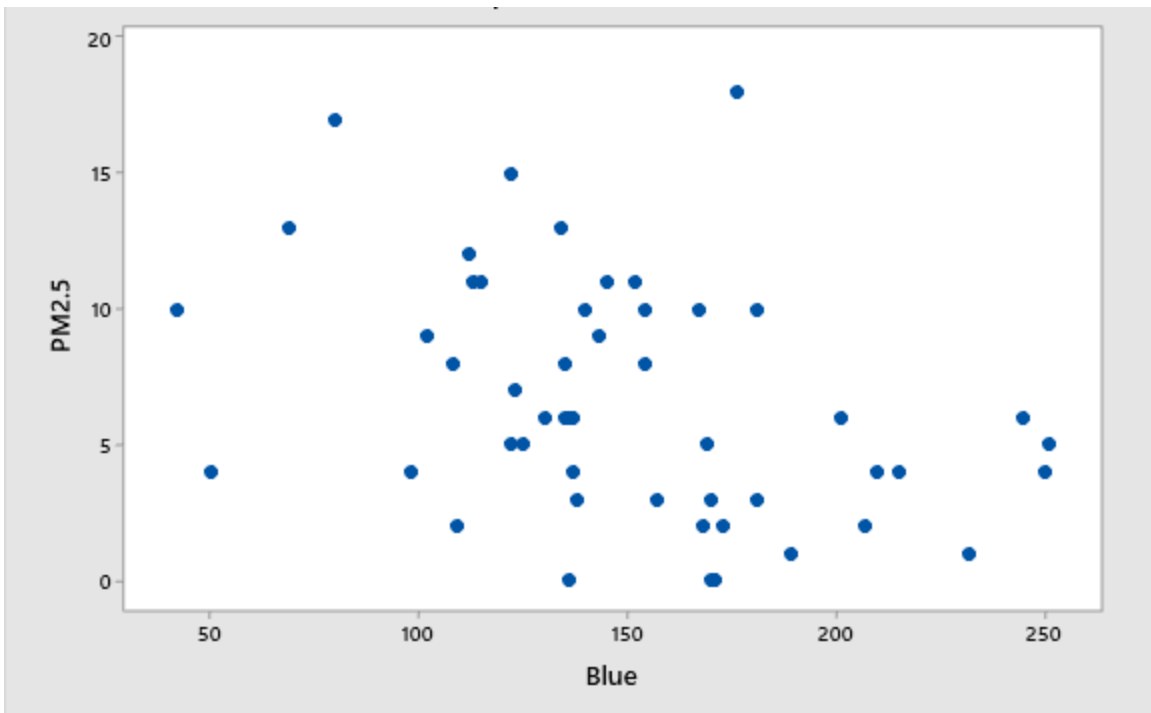


Figura 20. Diagrama de dispersión: PM_{2.5} vs Blue

Fuente: Autoría propia.

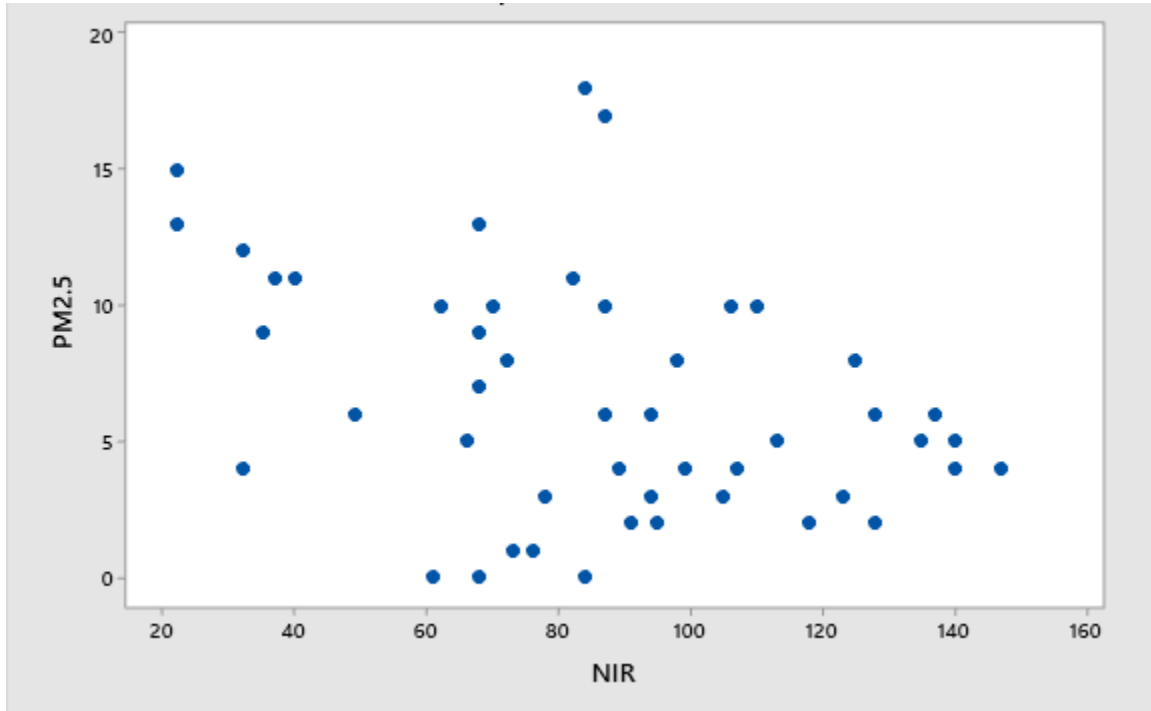


Figura 21. Diagrama de dispersión: PM_{2.5} vs NIR

Fuente: Autoría propia.

En la figura 22 se encuentran los resultados en forma de matriz de los coeficientes de correlación de Pearson de las variables estudiadas.

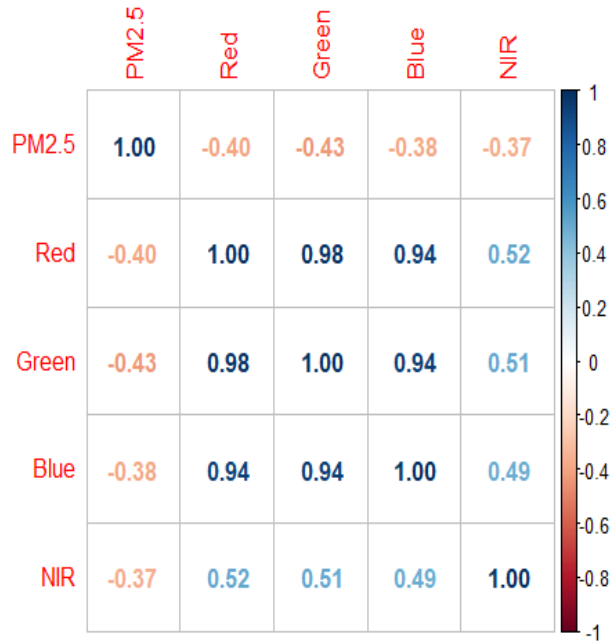


Figura 22. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson.

Fuente: Autoría propia.

De los valores obtenidos se puede apreciar que la correlación más fuerte, en este caso negativa, se da entre la variable $PM_{2.5}$ y la variable Green, seguido de las variables Red, Blue y NIR respectivamente.

5.2 Análisis de regresión

Este análisis pretende estimar la relación entre el valor de los ND de las bandas Red, Green, Blue y NIR con la concentración de $PM_{2.5}$, se aplicó una regresión lineal múltiple empleando mínimos cuadrados ordinarios para hallar los coeficientes. Se analizó el valor del coeficiente de determinación R^2 ajustado de las regresiones lineales planteadas, el cual determina la calidad de los modelos, lo cual explica la variabilidad de los datos a través del modelo lineal, además de esto también se considera el criterio de nivel de significancia, p-value.



Para obtener los modelos se realizaron varias combinaciones entre la variable dependiente ($PM_{2.5}$) y las variables independientes (Red, Green, Blue y NIR). Posteriormente se seleccionaron los modelos que mejores resultados estadísticos presentan, se observan a continuación en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados, coeficientes estadísticos.

Modelo	Ecuación	R ²	R ² adj	P - value
A	$PM_{2.5} = 11,71743 + 0,09766 \text{ Red} - 0,12783 \text{ Green} - 0,02908 \text{ NIR}$	0,2445	0,1952	0,004572
B	$PM_{2.5} = 0,29154 \text{ Red} - 0,26867 \text{ Green} - 0,01838 \text{ Blue} - 0,01688 \text{ NIR}$	0,6896	0,6626	3,479e-11

A partir del análisis se obtuvo que el modelo A y B son aquellos que tuvieron las mejores características estadísticas para presentar el comportamiento de $PM_{2.5}$. A continuación se presentan los modelos finales en las ecuaciones (2), (3).

$$PM_{2.5}(ug/m^3) = 11,71743 + 0,09766 * Red - 0,12783 * Green - 0,02908 * NIR \quad (2)$$

$$PM_{2.5}(ug/m^3) = 0,29154 * Red - 0,26867 * Green - 0,01838 * Blue - 0,01688 * NIR \quad (3)$$

Donde:

$PM_{2.5}(ug/m^3)$: Estimación de la concentración de material particulado menor a 2.5 micras, en microgramos por metro cúbico, en función de los valores de niveles digitales de las bandas Red, Green, Blue y NIR.



Red: Valor de nivel digital de la banda Red, de la cámara RGB.

Green: Valor de nivel digital de la banda Green, de la cámara RGB.

Blue: Valor de nivel digital de la banda Blue, de la cámara RGB.

NIR: Valor de nivel digital de la banda NIR, de la cámara NIR.

Respecto al modelo A, resultó ser uno de los más óptimos, ya que al momento de la combinación de bandas (Red, Green, Blue, NIR), además cuando se discriminan 1 o 2 de estas, y considerando siempre el valor del intercepto (punto de corte en el eje Y) se generó los mejores coeficientes estadísticos establecidos previamente. A continuación, en la tabla 5 se presenta los resultados para el modelo A, para cada variable independiente su coeficiente p-value:

Tabla 5. Resultados del modelo A.

Término	Coef	Error estándar del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	11,72	2,84	4,13	0,000	
Red	0,0977	0,0724	1,35	0,184	32,60
Green	-0,1278	0,0722	-1,77	0,083	32,49
NIR	-0,0291	0,0204	-1,42	0,161	1,36



S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
3,96098	24,45 %	19,52 %	9,67 %

Se observa que las mejores variables independientes para el modelo A son la banda Green seguido de la banda NIR y Red, se observa que su R^2_{Adj} es de 0,2 debido a la presencia del intercepto.

En el caso del modelo B, no se considera el valor del intercepto, debido a que se tiene la certeza de que las variables independientes (Red, Green, Blue y NIR) en ningún caso podrían asumir el valor de cero, ya que sí esto sucediera indicaría que la información captada por el sensor de las cámaras fuese errónea, de ser el caso los valores no serían útiles para la determinación del modelo, lo cual hace que añadir el intercepto en el modelo pierda sentido (Acuña, 2008). A continuación, en la tabla 6 se presentan los resultados del modelo para cada variable independiente, su coeficiente y su p-value:

Tabla 6. Resultados del modelo B.

Término	Coef	Error estándar		Valor p	FIV
		del coef.	Valor T		
Red	0,2915	0,0647	4,50	0,000	346,55
Green	-0,2687	0,0803	-3,35	0,002	413,22
Blue	-0,0184	0,0412	-0,45	0,657	97,05



NIR	-0,0169	0,0236	-0,71	0,478	10,97
-----	---------	--------	-------	-------	-------

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
4,62727	68,96 %	66,26 %	60,54 %

Se observa que las mejores variables independientes son en primer lugar la banda Red, seguido por la banda Green ya que su p-value es $<0,05$, además se observa que el R^2_{Adj} es $>0,5$ lo cual refleja la bondad del ajuste del modelo a la variable que pretender explicar en este caso $PM_{2.5}$.

Para evaluar los modelos se procedió a graficar los residuos de las dos regresiones con el fin de verificar la homocedasticidad de los resultados, cuando la varianza del error condicional a las variables explicativas es constante a lo largo de todas las observaciones (Cristancho, 2020). Los residuos estandarizados son iguales al valor del residuo, dividido entre una estimación de su desviación estándar, es útil para determinar valores atípicos, generalmente estos valores se consideran normales sí se encuentran en el rango de -2 a $+2$. Las gráficas de dispersión de los residuos se presentan a continuación:

Modelo A

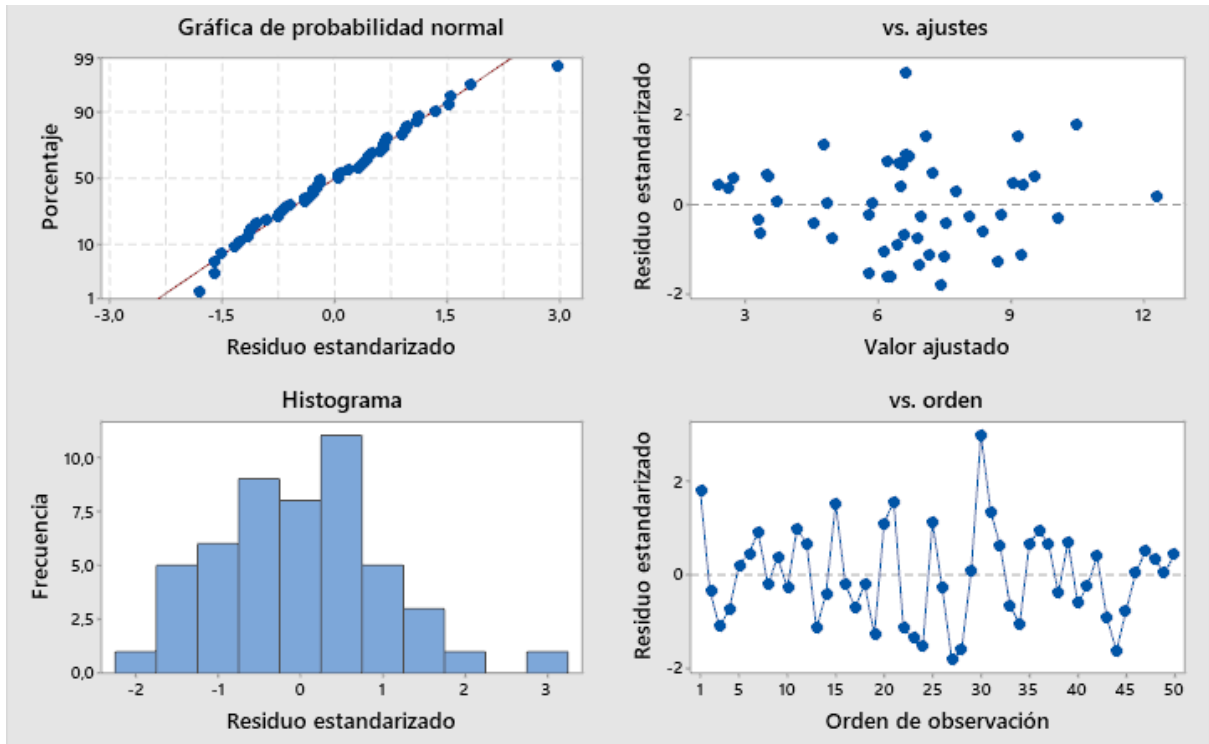


Figura 23. Gráficas de residuos para PM_{2.5} modelo A.

Fuente: Autoría propia.

Modelo B

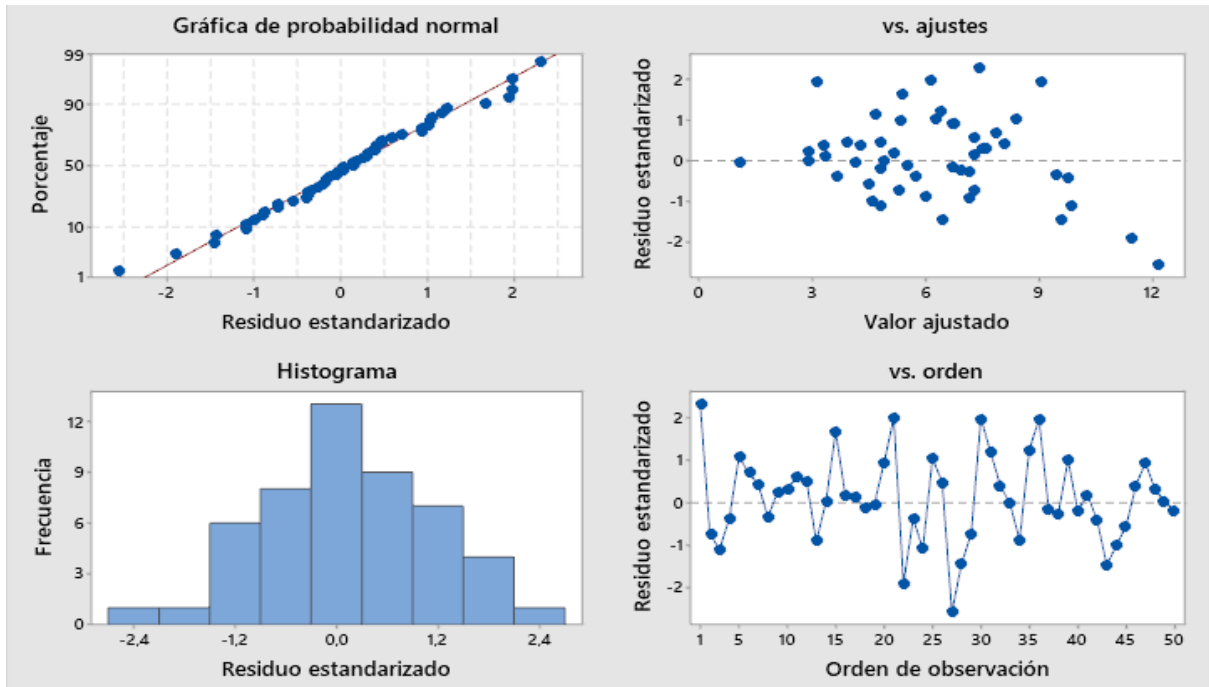


Figura 24. Gráficas de residuos para $PM_{2.5}$ modelo B.

Fuente: Autoría propia.

Los residuos estandarizados para los 2 modelos de estudio indican que estos se encuentran dentro del rango aceptable entre -2 y +2, en el caso de los valores que se encuentran fuera de este rango (1 valor en el modelo A y 2 en el modelo B) se consideran “outlier”, un valor marcado como diferentes al resto, estos valores provocan que las estimaciones de la regresión sean sustancialmente diferentes a lo que sería si esas observaciones fueran eliminadas (Kleinbaum et al., 2013). Sin embargo, para el caso de ambos modelos no representa una significativa a considerar, estos datos no tienen una influencia ni un apalancamiento importante, se volvió a correr los modelos sin estos datos correspondientes, dando resultados similares, sin afectar en gran medida al modelo de regresión original, por lo que se decidió mantener todos los datos dentro del análisis.



5.3 Validación del modelo de estimación de concentración de $PM_{2.5}$

Para la selección del modelo final se consideró los coeficientes estadísticos establecidos al principio de la investigación, que permiten tomar el modelo como válido, además del análisis de residuos para cada una de las ecuaciones generadas, donde se pudo seleccionar finalmente el modelo B. A continuación, se presentan 2 gráficas en base a los valores de $PM_{2.5}$ obtenidos en la estación de monitoreo y los valores predichos usando cada modelo matemático previamente generado con el fin de comparar la desviación que presentan estos valores con los datos reales. En el eje Y se presenta el rango en el cual se tienen los datos, mientras que en el eje X se presenta por orden el total de los datos, con el fin de observar si existe una desviación en base al valor real y predicho por cada dato. Para complementar la validación se tomó en cuenta una validación cruzada, con el método dejando uno fuera, del modelo seleccionado. De manera que se puede identificar el modelo con el mejor ajuste de los datos tras la validación, es el caso del modelo B que también tiene mejor comportamiento estadístico. En el caso del modelo A se observa en la figura 25 los valores reales vs los valores de respuesta predichos, se observa que los datos siguen la misma tendencia que los valores reales, sin embargo, este modelo no ofrece el mejor de los resultados para la detección de concentración de $PM_{2.5}$.

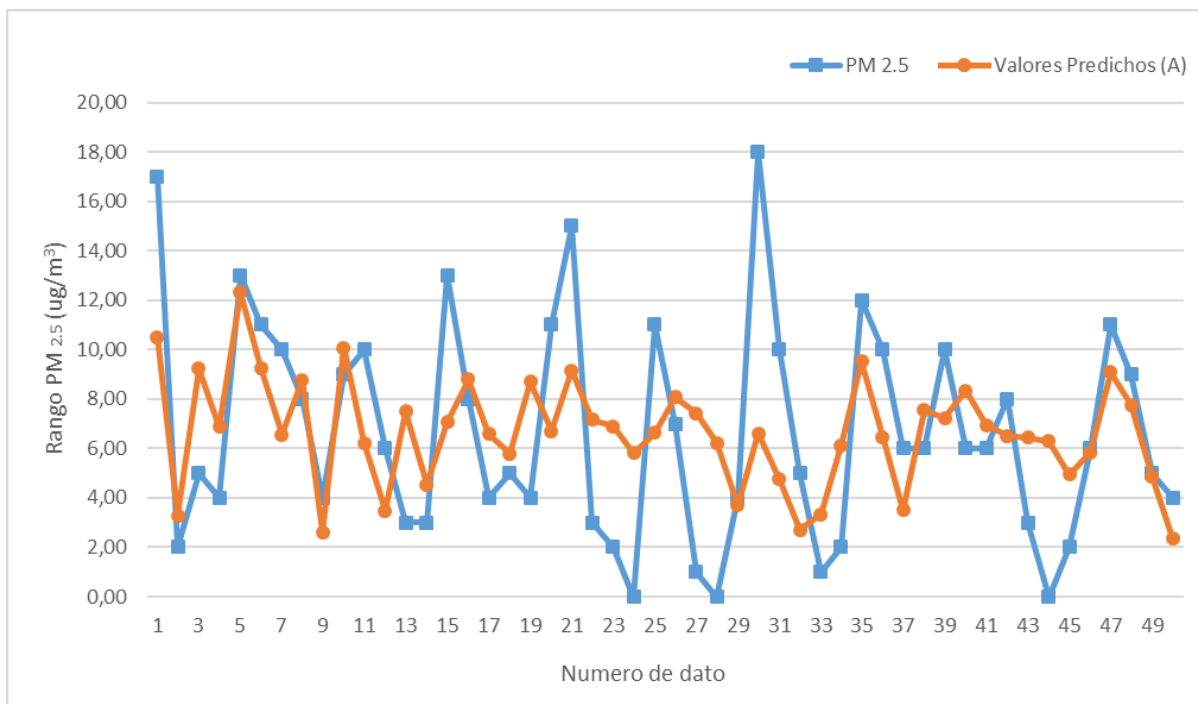


Figura 25. Respuesta predicha vs valores reales del modelo A.

Fuente: Autoría propia.

Respecto al modelo B se observa en la figura 26 los valores reales vs los valores de respuesta calculada, se observa que este modelo se ajusta de mejor manera a la tendencia de los datos, debido a esto el modelo B fue seleccionado como aquel que mejor resultados muestra. Cabe mencionar que los valores altos de concentración son aquellos que presentan mayor desviación, esto debido al bajo número de observaciones que representan una alta concentración del contaminante, por lo que en futuras investigaciones se recomienda tomar en consideración un mayor número de mediciones que abarquen rangos de concentraciones mayores para determinar la concentración de $PM_{2.5}$.

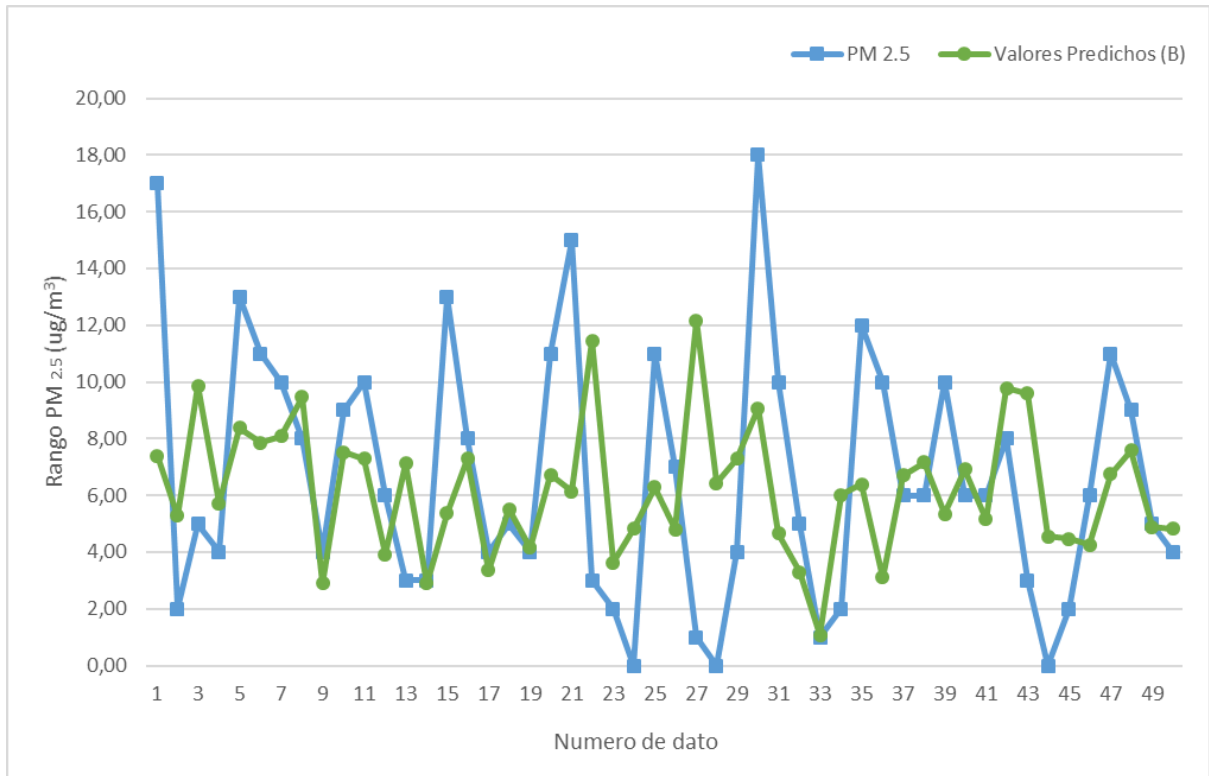


Figura 26. Gráfica de respuesta calculada vs respuesta real del modelo B.

Fuente: Autoría propia.

5.4 Mapas de estimación de la concentración de PM_{2.5}.

Una vez establecida la ecuación a utilizar, se procede a generar mapas temáticos de concentración de PM_{2.5} para el día 7 de julio, establecidos como datos de prueba posterior en campo, se generaron 5 datos horarios a partir de las 9h00 hasta las 13h00. Estos mapas temáticos presentan valores de concentración que van desde 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, sin embargo, las presencias de valores superiores no son considerados ya que son resultado de interferencias generadas por la alta reflectancia que se presenta en cubiertas de ciertas casas. Para determinar el límite sobre el cual los datos se consideran como inciertos, se tomó en consideración el valor máximo de concentración de PM_{2.5} en el área de estudio utilizado en el modelo de regresión, en base al informe de calidad del aire de la ciudad de



Cuenca 2019, fijando este valor en $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El valor medio anual de las concentraciones de la estación CCA asciende a $10,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, esta concentración es menor al promedio anual establecido por la NCAA ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$), y mayor al valor guía de la OMS ($10 \mu\text{g}/\text{m}^3$), respecto a la normativa vigente el promedio en 24 horas no debería ser superior a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (EMOV EP, 2019).

Cabe recalcar que el valor de interés, fue el correspondiente al valor del píxel donde se encuentra ubicada la estación de monitoreo continuo de $\text{PM}_{2.5}$ perteneciente a EMOV EP. En la figura 27 se logra apreciar la ubicación de la estación de monitoreo continuo de $\text{PM}_{2.5}$, representado su píxel sobre la zona de interés, por un punto de color azul dentro del área de estudio. Se observan diferentes mapas temáticos de la estimación de concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ para el día miércoles 7 de julio, cada uno representa valores horarios a partir de 9h00 hasta 13h00 respectivamente.

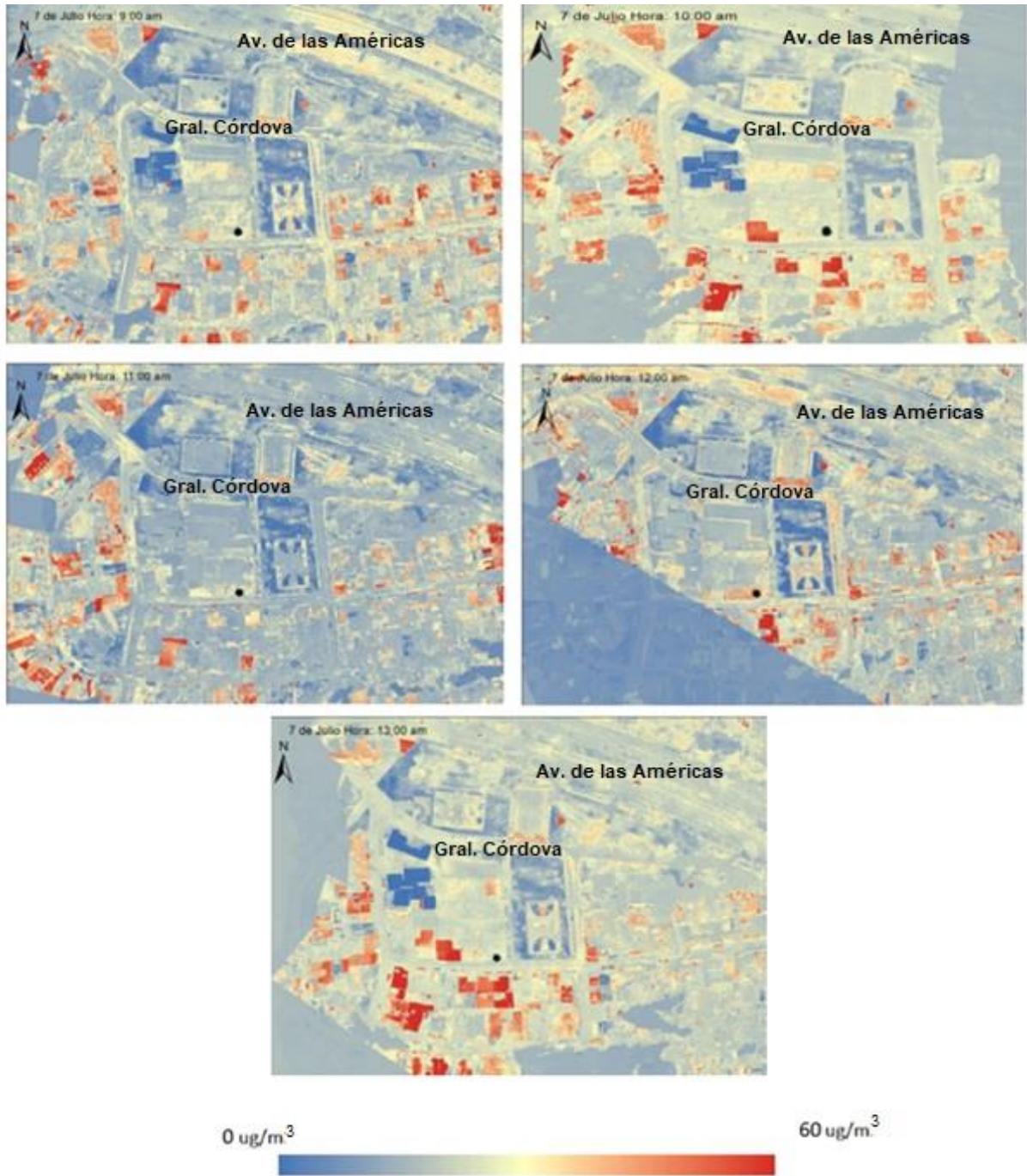


Figura 27. Mapas de concentración horaria de PM_{2.5} (ug/m³)

Fuente: Autoría propia.

A continuación, en la tabla 7 se presentan los valores de concentración propios de la estación de monitoreo continuo y sus respectivos valores de concentración predichos al



aplicar la ecuación determinada, representados anteriormente. Cabe destacar que en fechas posteriores al día miércoles 7 de julio de 2021 el sensor que determina la concentración de $PM_{2.5}$ dejó de funcionar, es decir no se registran datos de la estación CCA hasta la fecha (Octubre 2021).

Tabla 7. Concentración de $PM_{2.5}$ de estación y valor predicho.

<i>Fecha</i>	<i>Hora</i>	<i>$PM_{2.5}$ Estación ($\mu g/m^3$)</i>	<i>$PM_{2.5}$ Predicho ($\mu g/m^3$)</i>
7 de julio	9:00	14,00	13,12
7 de julio	10:00	11,00	10,31
7 de julio	11:00	7,00	3,81
7 de julio	12:00	5,00	7,59
7 de julio	13:00	7,00	4,24

5.5 Discusión / Análisis

5.5.1 Variación temporal / horaria de concentración $PM_{2.5}$

El comportamiento de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en horas de la mañana, presenta una marcada tendencia negativa, presentando en promedio la mayor concentración a las 9:00, con un valor de $11,56 \mu g/m^3$, mientras que la menor concentración se presenta a las 12:00, con un valor promedio de $3,6 \mu g/m^3$. Por tanto, en promedio la concentración máxima fue 3,21 veces mayor que la concentración mínima. Estos resultados concuerdan con los presentados en el estudio realizado por Franceschi et al., (2018), que identifican una tendencia similar respecto al contaminante de interés. En la figura 28 se presentan el promedio las concentraciones horarias de $PM_{2.5}$ registradas en la estación CCA durante el periodo de duración del estudio, de igual manera se presenta el promedio horario de los valores predichos por el modelo B.

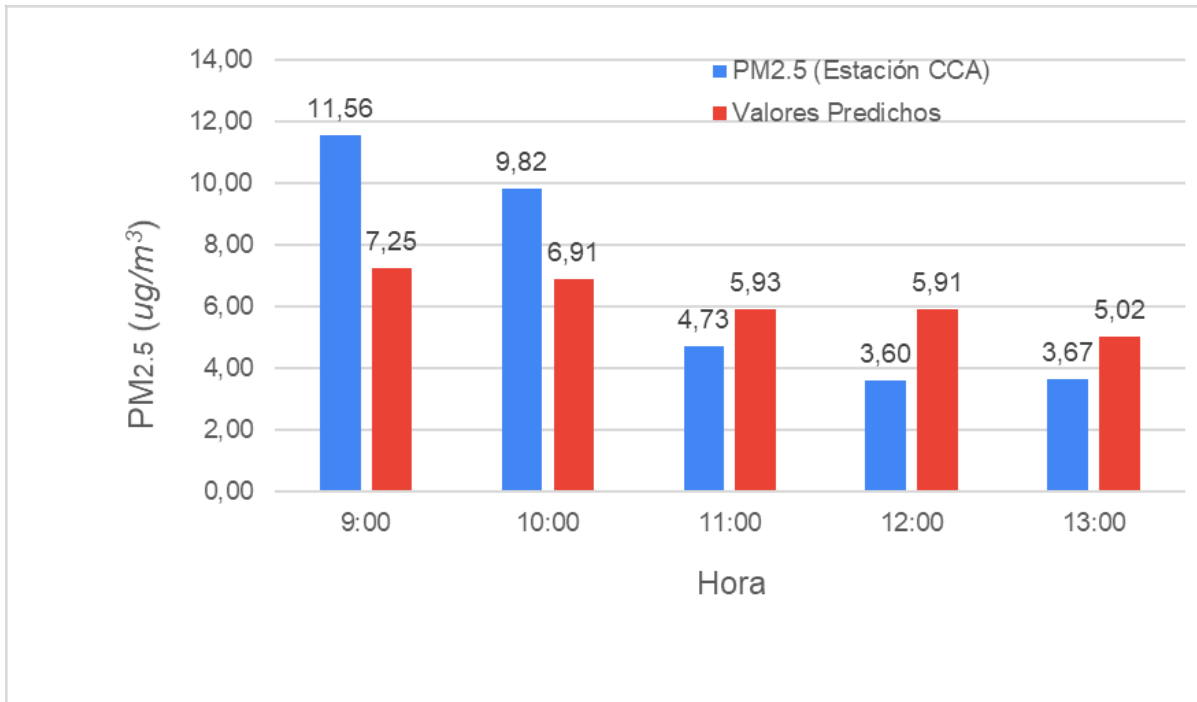


Figura 28. Promedio horario de concentración $PM_{2.5}$. Sector parque industrial, Cuenca.

Fuente: Autoría propia

La tendencia presente se da debido a la dispersión más efectiva del contaminante en horas de la mañana por el aumento de la velocidad de los vientos, esta genera una dilución atmosférica al desplazar y difundir el $PM_{2.5}$ a través de grandes masas de aire (Tique &



Pinzón, 2019). Además, según Romero & Rodriguez (2018) las velocidades de viento y temperaturas más altas se presentaron entre las 10:00 a 13:00 horas, lo cual genera un alto grado de inestabilidad atmosférica.

5.5 2 Análisis bandas espectrales y análisis modelos matemáticos

Tras realizar la regresión lineal múltiple para las bandas Red, Green, Blue y NIR; se obtuvo que las mejores bandas para generar los modelos fueron; para el modelo A la banda Green, con un P-value de 0,083450. Mientras que para el modelo B las mejores bandas fueron la Red y Green con un P-value de 4,54e-05 y 0,00163 respectivamente. En base al estudio de García (2018) el cual utiliza imágenes de Landsat 7 para la determinación de la concentración de $PM_{2.5}$, menciona que existe una alta correlación entre los valores de la banda 3 (Green 0,53-0,59 μm) con las concentraciones de $PM_{2.5}$ obtenidas de las estaciones fijas de monitoreo. Del mismo modo en el estudio de Alvarez & Padilla (2014) el cual determinó un modelo matemático para la determinación de PM_{10} a través de imágenes satelitales de Landsat-7 menciona que las bandas más adecuadas para la determinación de material particulado son las bandas 2 y 3 (Green y Red). También menciona que el modelo generado con estas bandas obtuvo un R^2 mayor al 90 % lo cual indica su validez para utilizar estas bandas en determinación de estos tipos de contaminantes y ciudad similares a Quito en el Ecuador lo cual es el caso del presente estudio.

Para los modelos generados para la estimación de la concentración de $PM_{2.5}$; se obtuvo para el modelo A un R^2 de 0,2445 y un P-value de 0,004572, mientras que para el modelo B el R^2 fue de 0,6896 y su P-value de 3,476e-11. Según Techarat (2013) menciona que existen varios estudios para la determinación de $PM_{2.5}$ mediante el uso de productos satélites, como MODIS, además en el caso de este contaminante se menciona que existe un estudio anterior de Engel (2006) que determinó un modelo matemático para la estimación de $PM_{2.5}$,



obteniendo un R^2 de 0,65. Al contrastar los resultados del estudio de Engel (2006) con los resultados del modelo B, se observa que existe una relación entre el R^2 de dicho estudio y el R^2 del modelo B, indicado que el modelo es estadísticamente válido para la estimación de la concentración de $PM_{2.5}$. Del mismo modo en el estudio de Jaliri (2020) el cual usó imágenes satelitales para comparar las firmas espectrales producidas por la presencia de materiales en suspensión en base al satélite LandSat 8, el cual presentó un R^2 de 0,7 lo cual según el estudio es un resultado válido; por lo cual al comparar el presente estudio (R^2 de 0,65) se confirma por qué se seleccionó el modelo B como aquel más adecuado para el estudio.

Estudios como el de Tobar (2018) en relación al análisis espacio temporal de contaminantes criterio atmosféricos (SO_2 y O_3) en zonas urbanas del Distrito Metropolitano de Quito, Criollo (2018) en relación a la valoración de la concentración de NO_2 atmosférico en el área urbana de la ciudad de Cuenca; y Baylón & Iglesias (2020) en la detección remota del NO_2 en la zona troposférica de América del Sur y su distribución espacial comprueban la efectividad del análisis espectral de las imágenes obtenidas a través diversos sensores de satélites como ASTER, NOAA y Landsat del servicio geológico de los Estados Unidos (USGS), en la detección y valoración remota de concentración de contaminantes atmosféricos. Corroborando que la metodología aplicada en relacionar los datos in situ de las concentraciones con valores espectrales de imágenes multiespectrales, permiten obtener modelos de regresión catalogados como aceptables. Es el caso de Criollo (2018) que en la validación del modelo que describe la concentración de NO_2 , obtuvo un coeficiente de determinación $R^2 = 0,78$; en el presente estudio se describe la concentración de $PM_{2.5}$, la validación del modelo más óptimo dio como resultado un $R^2 = 0,68$, confirmando la aplicabilidad de la metodología.

El orden de realización, la adquisición y tratamiento de imágenes satelitales, y en general de imágenes multiespectrales debe ser tomada como variable determinante en cuanto a



información espacial que se puede encontrar o derivar de una zona de interés (Tobar, 2018). De igual manera los datos en tierra de las concentraciones de los diversos contaminantes atmosféricos son primordiales para el desarrollo de modelos matemáticos que describen su comportamiento.

5.5.3 Análisis normativa y su relación con la salud la humana

En lo que respecta al cumplimiento de la norma ambiental, en promedio la estación de estudio cumple con el límite diario de $PM_{2.5}$, la misma que identifica 3 secciones de clasificación según el grado de concentración del contaminante en 24 horas. El primero de ellos, nivel de alerta con un límite de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido del nivel de alarma con un límite de $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y finalmente un nivel de emergencia con un límite de $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (TULSMA / Anexo 4, 2011). Adicionalmente, se destaca el cumplimiento del límite establecido por la OMS, de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de media en 24 h para $PM_{2.5}$, que en el caso de ser superado se catalogaría como un riesgo para la salud humana (OMS, 2021).

Altas concentraciones de $PM_{2.5}$ contribuyen a la mala visibilidad, tanto en zonas urbanas y rurales, y también ha tenido un impacto sobre el cambio climático global debido a las propiedades de absorción de luz del carbono elemental, el $PM_{2.5}$ es un contaminante tóxico del aire debido a que causa problemas respiratorios, como el asma, problemas cardiovasculares y enfermedades carcinogénicas, e induce varias reacciones alérgicas (Jaimes et al., 2012; Ding et al., 2009; Mills et al., 2005).

El $PM_{2.5}$ se deposita en la región alveolar del tracto respiratorio, que contiene hollín y otros derivados de las emisiones vehiculares e industriales y corresponde a una fracción agresiva, debido a que estas son respirables y tienen mayor efecto en la salud, ya que pueden



ingresar al sistema respiratorio depositándose en los alveolos pulmonares y llegar al torrente sanguíneo produciendo efectos negativos en la salud respiratoria, con mayor incidencia en personas susceptibles, niños y adultos mayores (Cormier et al., 2006; Dominici et al., 2006; Traversi et al., 2009).



6. Conclusiones

El servicio brindado por la EMOV-EP a través de Red de Monitoreo de Calidad del Aire permite el acceso a la información respecto a las inmisiones de la ciudad de Cuenca. Para monitoreo de material particulado menor a 2.5 micras se utilizan estaciones automáticas con datos horarios, que brindan la información concerniente que ha sido analizada en este estudio. La estación de monitoreo localizada en el colegio Carlos Arizaga (CCA) ha sido considerada como la más importante debido a su ubicación, cercanía a la zona industrial de la ciudad, además del alto flujo vehicular que presenta.

Se obtuvieron todos los datos satisfactoriamente de acuerdo al cronograma de actividades establecido, los cuales se procesaron en ortofotografías para la posterior extracción del valor del píxel correspondiente a la estación de monitoreo. Se generó una base de datos con los valores de $PM_{2.5}$ de la estación y los valores de ND de las bandas Red, Green, Blue y NIR con la finalidad de generar una ecuación, a través de una regresión lineal múltiple, que determine dicha concentración sin la necesidad de contar con la estación en tierra.

Se obtuvieron 2 modelos que presentan los mejores resultados en su R-cuadrado ajustado y p-value, el modelo A cuenta con un R-cuadrado ajustado de 19,52 % y p-value de 0,00457; el modelo B presenta un R-cuadrado ajustado de 66,26 % y p-value de $3,479e-11$, este último mostró mejores resultados debido a la omisión del término intercepto en la ecuación, debido a la naturaleza de los datos lo cual permite prescindir de este.



En el modelo B se observa que los mejores resultados para los valores predichos son para aquellos datos obtenidos de la estación de monitoreo que se encuentren dentro de un rango intermedio-bajo, debido a que en su mayoría la base de datos utilizada para la generación del modelo presenta en su mayoría esta tendencia, por lo cual para datos altos el modelo no se ajusta de la mejor manera. Por lo cual se debería tomar una mayor cantidad de datos que incluya un rango de datos más variados para la generación del modelo de regresión lineal.

Los mapas de estimación de la concentración de $PM_{2.5}$ generados representan de muy buena manera la realidad que se da en el área de estudio, las concentraciones del contaminante están representadas por la actividad industrial y el tráfico vehicular elevado, dichas concentraciones tienen estrecha relación con valores observados a lo largo del estudio.

El modelo generado por el estudio se centra en estimar las concentraciones de $PM_{2.5}$, más no determinarlas de forma exacta, ya que al intervenir factores adicionales como atmosféricos y tecnológicos impiden tener una respuesta exacta del contaminante. De este modo, se cumple satisfactoriamente el objetivo de investigación al ayudar a determinar si en una zona donde se aplique esta metodología, está se encuentra dentro o fuera del criterio de clasificación según el grado de concentración del contaminante en 24 horas, listado en la normativa Ecuatoriana o a su vez el promedio diario del contaminante normado por la OMS.

6.1 Limitaciones

Se destaca que en el presente proyecto empleó cámaras *Mapir Survey 3*, las cuales cuenta con un error de alrededor de $\pm 1,5$ metros en su sensor GPS al momento de



georreferenciar las imágenes obtenidas (Mapir, 2020), esto genera que las imágenes obtenidas pueden estar desplazadas de su verdadera posición. Se traduce que a la hora de la construcción del ortomosaico esté presenta ciertas distorsiones y desplazamientos.

Otra gran limitación para el estudio fue la ausencia de equipos que monitoreen otros contaminantes además de $PM_{2.5}$ de forma continua, ya que el estudio en primera instancia se había planteado para más contaminantes como PM_{10} , SO_x y NO_x .

6.2 Recomendaciones

Para corregir la situación de la deficiente georreferenciación se recomienda hacer uso de GPC (Ground Position Points), en el caso de la marca DJI con su tecnología RTK el error que se obtiene en la georreferenciación de imágenes es de $\pm 0,01$ m (DJI, 2020), logrando una mayor precisión que con el uso solamente del sensor GPS. Además, para mejor la precisión del modelo para la determinación de valores de $PM_{2.5}$ altos, se recomienda ampliar el tiempo de toma de datos para que exista una mayor variedad de los mismos sobre todos valores altos para que estos puedan ser considerados de mejor manera en el modelo.

Es de suma importancia potenciar este tipo de investigaciones, dado como es el caso del contaminante $PM_{2.5}$ la cobertura anual de las 3 estaciones de monitoreo continuo por parte de la EMOV EP en el mejor de los casos no supera el 55 %. Esto debido al poco frecuente mantenimiento de las estaciones y al bajo número de personal especializado en el tema con el que cuenta la institución.



6.3 Futuras investigaciones

En relación a la metodología descrita en este estudio puede resultar interesante profundizar en el uso de diversas cámaras que presenten otro tipo de bandas para aplicarlas en la detección de diversos tipos de contaminantes atmosféricos como pueden ser: PM_{10} , CO_2 , NO_x , SO_x y O_3 .

Los resultados del estudio demuestran que es factible aplicar esta metodología para caracterizar la atmósfera de la ciudad de Cuenca a partir del uso de Dron y cámaras multiespectrales, debido al bajo rango de detección y su poca área cubierta por las estaciones de monitoreo continuo presente en la ciudad, funcionando como una alternativa para determinar la presencia o ausencia de un contaminante en una zona determinada.



Referencias

- Acuña, E. (2008). Análisis de Regresión. *Mayagüez: Edgar Acuña*. Recuperado de: <https://academic.uprm.edu/eacuna/miniman3sl.pdf>
- Aguilar, H., Zamora, R. y Vargas, C. (2014). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes ASTER, RAPIDEYE, SPOT 2 y Landsat 8 con el módulo FLASH del software ENVI. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53), 39–59.
- Aguilar, H., Mora, R., & Vargas, C. (2015). Metodología Para La Corrección Atmosférica De Imágenes Aster, Rapideye, Spot 2 Y Landsat 8 Con El Módulo Flaash Del Software Envi. *Atmospheric Correction Methodology For Aster, Rapideye, Spot 2 And Landsat 8 Images With Envi Flaash Module Software*. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53), 39–59. <https://doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>
- Akimoto, H. (2003). Global Air Quality and Pollution. *Science*, 302(5651), 1716–1719. <https://doi.org/10.1126/science.1092666>
- Alvarado, X. (2006). Impacto en la salud ambiental por efecto de emisiones de dióxido de azufre del Volcán Arenal, en la población de la Fortuna de San Carlos. *Revista Costarricense de Salud Pública*, 15(29), 25–34.
- Alvarez, C. I., & Padilla, O. (2014). ESTIMACIÓN DE CONTAMINACIÓN DEL AIRE POR PM10 EN QUITO DETERMINADO POR ÍNDICES AMBIENTALES OBTENIDOS CON IMÁGENES SATELITALES LANDSAT ETM+. 11.
- Acevo Herrera, R. (2011). Sistemas de teledetección activos y pasivos embarcados en sistemas aéreos no tripulados para la monitorización de la tierra. *Universitat Politècnica de Catalunya*.
- Anderson, J., Thundiyil, J., & Stolbach, A. (2011). Clearing the Air: A Review of the Effects of Particulate Matter Air Pollution on Human Health. *Journal of Medical Toxicology*, 8(2), 166–175. doi:10.1007/s13181-011-0203-1



- Anenberg, S. C., Horowitz, L. W., Tong, D. Q., & West, J. J. (2010). An Estimate of the Global Burden of Anthropogenic Ozone and Fine Particulate Matter on Premature Human Mortality Using Atmospheric Modeling. *Environmental Health Perspectives*, 118(9), 1189–1195. doi:10.1289/ehp.0901220
- Armitage. P., Berry. G. (1992) Estadística para la investigación biomédica. Barcelona: Doyma.
- Arciniégas. C. (2012). DIAGNÓSTICO Y CONTROL DE MATERIAL PARTICULADO: PARTÍCULAS SUSPENDIDAS TOTALES Y FRACCIÓN RESPIRABLE PM10. *Revista Luna Azul*. Universidad de Caldas. Manizales - Colombia. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/3217/321727348012.pdf>
- Arozarena, A., Otero, I., & Ezquerro, A. (2016). Sistemas de Captura de la Información: Fotogrametría y Teledetección. Madrid, España: Lettera63. Recuperado el 2 de Septiembre de 2018.
- Arroyo, V., & Rubbing, F. (2017). Determinación del material particulado, dióxido de azufre y monóxido de carbono en el centro poblado El Arenal – Islay. *Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa*. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2432>
- Ballester, F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. *Revista Española de Salud Pública*, 79(2), 159–175.
- Basly, L., & Wald, L. (s/f). *Remote sensing and air quality in urban areas*. 9.
- Baylón, A. A. R., & León, S. D. P. I. (2020). Detección remota del NO₂ en la zona troposférica de América del Sur y su distribución espacial. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 23(46), 131-137.
- Bell, M., Samet, J., y Dominici, F., (2004). Time-series studies of particulate matter. *Annual Review of Public Health Palo Alto.*, Vol. 25; p. 247-280.



- Castell, N., & Mantilla, E. (2002). *Algunos aspectos de la dinámica del ozono troposférico en la vertiente mediterránea*. Agencia Estatal de Meteorología. <https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/9165>
- Castillo, O. (2012). Aplicación espectral y topológica en el procesamiento de imágenes satelitales. Universidad Nacional de Colombia.
- Castro, G. (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*. <http://repositorio.ucm.edu.co:8080/jspui/handle/10839/2557>
- Céspedes, J., Cuero, J. (2015). METODOLOGÍA PARA MEDIR LAS CONCENTRACIONES DE AEROSOLAS ATMOSFÉRICOS USANDO TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN. Universidad del Valle. Cali - Colombia.
- Chang, C. C., Wang, J. L., Chang, C. Y., Liang, M. C., & Lin, M. R. (2016). Development of a multicopter-carried whole air sampling apparatus and its applications in environmental studies. *Chemosphere*, 144, 484-492.
- Chuvieco, E. (2000). Fundamentos de teledetección espacial. Rialp. S.A. Madrid España. 568 p.
- Cole, J. H. (2002). Nociones de regresión lineal. *Universidad Francisco Marroquín. Octubre*.
- Cobo, R. J., & Arcos, F. A. (2016). Análisis y revisión de la red de monitoreo de calidad del aire de la ciudad de Cuenca—Ecuador. *La Granja*, 23(1), 28–38. <https://doi.org/10.17163/lgr.n23.2016.03>
- Cormier, S., Lomnicki, S., Backes, W. & Dellinger, B. (2006). Origin and health impacts of emissions of toxic by-products and fine particles from combustion and thermal treatment of hazardous wastes and materials. *Environ. Health Perspect.*, 114(6), 810-817.



- Crespo, A., & Cristina, L. (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*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/25484>
- Criollo, C. (2018). *Valoración de la concentración de dióxido de nitrógeno atmosférico (NO₂) en el área urbana de la ciudad de Cuenca a través de imágenes satelitales (Bachelor's thesis)*.
- Cristancho, C. (2020). *Análisis de imágenes aéreas* Análisis de imágenes aéreas como apoyo para el seguimiento el seguimiento de cultivos de pasto para consumo bovino. Universidad de La Salle, Bogotá. Recuperado de: https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1783&context=ing_automatizacion
- Cuerno, C., García, L., Sánchez, A., Carrio, A., Sánchez, J., & Campony, P. (Mayo-Junio de 2016). Evolución histórica de los vehículos aéreos no tripulados hasta la actualidad. *Dyna*, 91(3), 7.
- Cuevas, E. (1995). *Estudio del comportamiento del ozono troposférico en el observatorio de Izaña (Tenerife) y su relación con la dinámica atmosférica*. <https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/2047>
- De Castro, A.I. Peña, J.M.; Torres, J.; and López, F. (2012). Generating weed maps in early-season maize fields by using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and object-based image analysis. *PloS One*, e77151.
- Della, L. S. (2018). *Análisis espacio-temporal de la distribución de aerosoles atmosféricos en la ciudad de Córdoba (Argentina) y desarrollo de un modelo predictivo de los niveles de material particulado* (Master's thesis).
- Ding LC., Ke F., Wang DKW., Dann T.,Austin CC.(2009). *A new direct thermal desorption-GC/MS method: Organic speciation of ambient particulate matter collected in Golden, BC*. *Atmos Environ*.43:4894-4902.



DJI. (2020). Phantom 4 PRO. Visionary Intelligence - Elevated Imagination. Recuperado de:
<https://www.dji.com/phantom-4-pro?from=p4p-or-p4a>

Dominici, F., Peng, R.D., Bell, M.L., Pham, L., McDermott, A., Zeger, S.L. & Samet, J.M. (2006). Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases. *J. Am. Med. Assoc.*, 295, 1127-1134.

EarthDATA NASA, "Giovanni", v. 4.21.6. [Online]. Available: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>. [Accessed: 14-Oct-2021].

EMOV- EP. (2012). Red de Monitoreo de calidad de aire de la. Resumen del inventario de emisiones atmosféricas del Cantón Cuenca del año 2009. EMOV-Alcaldía de Cuenca, Cuenca-Ecuador 2012: 1-10

EMOV. (2019). Informe de Calidad de Aire Cuenca 2019. Recuperado de:
https://www.emov.gob.ec/sites/default/files/CALIDAD_DEL_AIRE_2019.pdf

Engel, J. A., Hoff, R. M., Rogers, R., Dimmick, F., Rush, A. C., Szykman, J. J., ... & Zell, E. R. (2006). Integrating lidar and satellite optical depth with ambient monitoring for 3-dimensional particulate characterization. *Atmospheric Environment*, 40(40), 8056-8067.

Espinoza, E. P., & Molina, C. E. (2014). Contaminación del aire exterior Cuenca—Ecuador, 2009—2013. Posibles efectos en la salud. *Revista de la Facultad de Ciencias Médicas de la Universidad de Cuenca*, 32(2), 6–17.

Espinoza, A. (2011). *Diseño de un sistema de información geográfica para la Red de Monitoreo Ambiental de la ciudad de Cuenca*.
<http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/2042>

Fang, G.C., Chang, C.N., Chu, C.C., Wu, Y.S., Fu, P., Yang, I.L., y Chen, M.H. (2003). Characterization of particulate, metallic elements of TSP, PM2.5 and PM2.5-10



aerosols at a farm sampling site in Taiwan Taichung. *The Science of the Total Environment*, 308, 157-166.

Franceschi, F., Cobo, M., & Figueredo, M. (2018). Discovering relationships and forecasting PM10 and PM2.5 concentrations in Bogotá Colombia, using Artificial Neural Networks, Principal Component Analysis, and k-means clustering. *Atmospheric Pollution Research*, 9(5), 912– 922. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.02.006>

Frejafon. E., *et al.* (1998). “Laser applications for atmospheric pollution monitoring”. *Eur.Phys.J. D4*, 231-238.

Garcia, F.F. (2002). Determinación de la Concentración de Fondo y Distribución Espacial de PST en Santa Marta. Grupo de Control de la Contaminación Ambiental. Universidad del Magdalena, Colombia.

García, J. (2015). Estudio de índices de vegetación a partir de imágenes aéreas tomadas desde UAS/RPAS y aplicaciones de éstos a la agricultura de precisión. Recuperado de: https://eprints.ucm.es/id/eprint/31423/1/TFM_Juan_Diaz_Cervignon.pdf

García, C. (2018). Concentración de Material Particulado PM2,5 en Función de la Humedad y Reflectancia Atmosférica Usando Imágenes Landsat-8 en Lima Metropolitana, 2015 – 2016. *Revista Científica Pakamuros*, 6(1), 11–11. <https://doi.org/10.37787/pakamuros-unj.v6i1.59>

Geffen, H. J. E. J. H. G. M. van. (2019). TROPOMI ATBD of the total and tropospheric NO2 data products. (1), 76.

Greenberg, J. P., Guenther, A., Zimmerman, P., Baugh, W., Geron, C., Davis, K., ... & Klinger, L. F. (1999). Tethered balloon measurements of biogenic VOCs in the atmospheric boundary layer. *Atmospheric Environment*, 33(6), 855-867.



Hameed, S., & Hasan, G. (2014). Estimation of PM10 Concentration using Ground Measurements and Landsat 8 OLI Satellite Image. *Journal of Geophysics & Remote Sensing*, 3(2), 1–6. <http://doi.org/10.4172/2169-0049.1000120>

IBM. (2021). Estadísticas de SPSS. Regresión no Lineal. Recuperado de: <https://www.ibm.com/docs/en/spss-statistics/SaaS?topic=regression-nonlinear>

INE-SEMARNAT, 2003. Programa Nacional de Monitoreo Atmosférico. CENICA, México

INEC. (2010). Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Ecuador 2010. Disponible en WWW Inec.gob.ec.

Jaimes, J. H. G., Vargas, M. J. Q., & Parra, A. Q. (2012). Monitoreo y caracterización fisicoquímica del material particulado PM2.5 en Cúcuta-Norte de Santander-Colombia. *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 10(1), 24-38.

Jara, S., & Marcelo, P. (2018). La teledetección enfocada a la obtención de mapas digitales. *instname:Universidad de Cuenca*. <http://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/1109083>

Jaliri, C. (2020). Uso de imágenes satelitales para la determinación de presencia de partículas en suspensión en la bahía interior de Puno – 2019. *Universidad Privada San Carlos*. <http://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC/4617>

Jerves. R., Armijos–Arcos. F. (2016). ANÁLISIS Y REVISIÓN DE LA RED DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE DE LA CIUDAD DE CUENCA, ECUADOR.

Kleinbaum, D. G., Kupper, L. L., Nizam, A., & Rosenberg, E. S. (2013). *Applied regression analysis and other multivariable methods*. Cengage Learning.



Kohavi, R. (1995). *A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection*. Recuperado de: <http://citeseer.ist.psu.edu/kohavi95study.html>

Leandro, J. C., Masiokas Mariano, H., & Carlos, M. S. (2019). WEB PLATFORM for SATELLITE IMAGES DIGITAL PROCESSING FOCUSED on HYDROCLIMATIC MANAGEMENT. Paper presented at the *2018 IEEE Biennial Congress of Argentina, ARGENCON 2018*, doi:10.1109/ARGENCON.2018.8646187 Retrieved from www.scopus.com

Li, B., & Hou, L. (2015). Discuss on Satellite-Based Particulate Matter Monitoring Technique. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XL-7/W3*, 219–223. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-219-2015>

Libro calidad aire 1. (2020). Recuperado el 12 de octubre de 2020, de <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/10/libro-calidad-aire-1-final.pdf>

López, J., Mandujano, C. (2005). Sistema de absorción óptica diferenciada del espectro (DOAS) para evaluar la calidad del aire. *Revista CENIC. Ciencias Químicas. Centro Nacional de Investigaciones Científicas. La Habana - Cuba*. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181620511024>

Lozano Arias, J. A. (2021). Análisis de distintos tipos de coberturas mediante el uso de cámara multiespectral tomadas desde dron en el Valle de Aburrá. Recuperado de: http://tesis.udea.edu.co/bitstream/10495/20219/2/LozanoJose_2021_TeledeteccionDronesClasificacion.pdf

MAPIR. (2020). Cámara Survey 3W - Luz visible RGB. Survey 3W Camera - Near Infrared (NIR). Recuperado de: <https://www.mapir.camera/collections/survey3/products/survey3w-camera-near-infrared-nir>



MiniTab. (2019). Soporte de Minitab 18. Recuperado de: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/>

Mills NL., Tornqvist H., Robinson SD., Darnley K., Gonzales M., Boon NA., MacNee W., Donaldson K., Blomberg A., Sandstrom T., Newby DE. (2005). *Diesel exhaust inhalation causes vascular dysfunction and impaired endogenous fibrinolysis: An explanation for the increased cardiovascular mortality associated with air pollution*. *J Am Coll Cardiol*.45 (3): 390a– 390a.

Mohd Noor, N., Abdullah, A., & Hashim, M. (2018). Remote sensing UAV/drones and its applications for urban areas: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 169, 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/169/1/012003>

Morelo. F., Salvador. P., Nuñez. L., Artiñano. B., Pujadas. M. (2001). Teledetección LIDAR de aerosoles troposféricos en la ciudad de Madrid. Departamento de Impacto Ambiental de la Energía. Ministerio de Ciencia y tecnología. Madrid - España

Morgan, B. J., Stocker, M. D., Valdes-Abellan, J., Kim, M. S., & Pachepsky, Y. (2020). Drone-based imaging to assess the microbial water quality in an irrigation pond: A pilot study. *Science of the Total Environment*, 716 doi:10.1016/j.scitotenv.2019.135757

Murillo, R., Arcedalia, N. (2019). Análisis de validación cruzada bajo diferentes condiciones de ruido. Recuperado de: <http://51.143.95.221/bitstream/TecNM/810/1/Natalia%20Arcedalia%20Rodr%c3%a%20guez%20Murillo.pdf>

Nisperuza, D. J., Vásquez, L. K., Morales, S. T., & Puerta, L. M. (2020). Teledetección: una herramienta para estudios de calidad del aire en la zona urbana del Valle de Aburrá.

OMS. (2013). WHO. *Contaminación del aire*. Recuperado el 12 de octubre de 2020, de http://www.who.int/topics/air_pollution/es/



- O'Ryan, R., & Larraguibel, L. (2000). *Contaminación del aire en Santiago: estado actual y soluciones* (Vol. 75). Centro de Economía Aplicada, Universidad de Chile.
- Palacios. E., Espinoza. C. (2014). Contaminación del aire exterior. Cuenca - Ecuador, 2009-2013. Posibles efectos en la salud. Revista de la Facultad de Ciencias Médicas - Universidad de Cuenca. Recuperado de: <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/medicina/article/view/883/781>
- Peräjärvi, K., Lehtinen, J., Pöllänen, R., & Toivonen, H. (2008). Design of an air sampler for a small unmanned aerial vehicle. *Radiation protection dosimetry*, 132(3), 328-333.
- Pita, S. (1997). Relación entre variables cuantitativas. *Cad Aten Primaria*; 4: 141-144
- Pita, S., Pértegas, J. (2002). Determinación del tamaño muestral para calcular la significación del coeficiente de correlación lineal. Unidad de Epidemiología Clínica y Bioestadística. Complejo Hospitalario Juan Canalejo. Coruña - España
- Parody, A., Zapata, E. de J. (2018). Agricultura De Precisión En Colombia Utilizando Teledetección De Alta Resolución. *Suelos Ecuatoriales*, 48(1 y 2), 41-49. http://unicauca.edu.co/revistas/index.php/suelos_ecuatoriales/article/view/94
- Pöschl. U. (2005) Atmospheric Aerosols: Composition, Transformation, Climate and Health Effects. *Angew Chem Int Ed Engl*. 44: 7520 – 7540.
- Reagan. J., et al. (1989). "Lidar sensing of aerosols and clouds in the troposphere and stratosphere". *Proc IEEE*, 433-448.
- Renwick, M. J., Klein, D. L., & Hamann, D. H. (s/f). *Drone-based Reconstruction for 3D Geospatial Data Processing*. 6.
- Riaño, J., & Yesid, Q. (2019). *Evaluación de la eficiencia de remoción de material particulado y dióxido de azufre (so2) en un lavador tipo venturi para una caldera que emplea carbón como combustible*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/20682>



- Rodríguez, E. (2005). Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. *Anuario jurídico y económico escurialense*, (38), 315-331.
- Romero, K., Rodríguez, L. (2018). *Análisis multitemporal de las condiciones de estabilidad y meteorológicas para la gestión del recurso atmosférico en la ciudad de Bogotá*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Recuperado de <http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/13985/1/RodríguezGaravitoLize2018.pdf>
- Rohi, G., Ejofodomi, O., & Ofualagba, G. (2020). Autonomous monitoring, analysis, and countering of air pollution using environmental drones. *Heliyon*, 6(1), e03252. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03252>
- Rojas, F. (2018). Modelación numérica del transporte de contaminantes atmosféricos y su relación con las condiciones meteorológicas en Lima Metropolitana.
- Romero, F. (2006). Teledetección Satelital en la Vision Territorial y Sistemas De Protección Ambiental Urbano-Rural (1a Parte). *Urbano*, 9(14), 77–84.
- Sedano, F., & Pari, R. W. (2019). Ventajas en los levantamientos topográficos con el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV). *Universidad Privada del Norte*. <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/2106>
- Settele, J., Scholes, R., Betts, R. A., Bunn, S., Leadley, P., Nepstad, D., & Root, T. (2015). Terrestrial and inland water systems. In *Climate change 2014 impacts, adaptation and vulnerability: Part A: Global and sectoral aspects* (pp. 271-360). Cambridge University Press.
- Sifakis, N. (1992). Mapping of Air Pollution Using SPOT Satellite Data. *PHOTOGRAMMETRIC ENGINEERING*, 5.
- Suárez. L., Álvarez. D., Bendezú. Y. & Pomalay. J. (2017). Caracterización química del material particulado atmosférico del centro urbano de Huancayo, Perú. *Revista de la*



Sociedad Química del Perú, 83(2), 187-199. Recuperado en 14 de octubre de 2020, de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2017000200005&lng=es&tlng=es.

Suarez, L. (2006). Estudio de la variación estacional de ozono troposférico y aerosoles del Perú relacionado a las quemadas de vegetación en la Amazonía. *Mosaico Científico*, 3, 36–41.

Tang, L., & Shao, G. (2015). Drone remote sensing for forestry research and practices. *Journal of Forestry Research*, 26(4), 791–797. <https://doi.org/10.1007/s11676-015-0088-y>

Tiempo, C. E. E. (2018, mayo 2). *Los más pobres todavía cargan 'el mayor peso' de la contaminación*. El Tiempo. <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/informe-de-la-oms-sobre-contaminacion-del-aire-en-el-mundo-212282>

Tique, V., & Pinzón, A. (2019). *Análisis de series de tiempo de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Bogotá a partir de desarrollo de modelos estadísticos ARIMA*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Techarat, P. (2013). *Mapping Predictive Ambient Concentration Distribution of Particulate Matter and Sulfur Dioxide for Air Quality Monitoring Using Remote Sensing* [Thesis, Faculty of Graduate Studies and Research, University of Regina]. <https://ourspace.uregina.ca/handle/10294/5478>

Tobar, L. D. (2018). Análisis espacio-temporal de los contaminantes criterio atmosféricos en la zona urbana del Distrito Metropolitano de Quito, mediante el uso de Tecnologías Geoespaciales para los años 2013, 2014 y 2015 (Bachelor's thesis, PUCE-Quito).

Torres, C y Galindo, O. (2016). *Comportamiento del material particulado y su incidencia en los usuarios de la ciclo-vía recreativa de la carrera séptima en Bogotá D.C.* (Tesis de



pregrado). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Recuperado de:
<http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/6238/5/TorresGarc%c3%adaCarlosAlberto2017.pdf>

Torres, N. S., & Vivanco, V. L. (2018). *Comparación en la estimación de material particulado PM10 usando imágenes satelitales LANDSAT 7, LANDSAT 8 Y MODIS en Quito.*
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16071>

Traversi, D., Degan, R., De Marco, R., Gilli, G., Pignata, C., Villani, S. & Bono, R. (2009). Mutagenic properties of PM2.5 urban pollution in Northern Italy: the nitro-compounds contribution. *Environment International*, 35, 905-910

Trédaniel, J., Durand, C., Teixeira, L., Staudacher, L., Beuzelin, C., Jagot, J.-L., ... Salmeron, S. (2013). *La pollution atmosphérique, cause de cancer bronchique ? Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, 72(3), 290–296.
<https://doi.org/10.1016/j.admp.2011.02.010>

TULSMA, ANEXO 4. (2011). Norma de calidad del aire ambiente o nivel de inmisión. Norma Ecuatoriana de la Calidad del Aire. Recuperado de:
http://www.quitoambiente.gob.ec/images/Secretaria_Ambiente/red_monitoreo/informacion/norma_ecuato_calidad.pdf

Vásquez, J. D., & Arboleda, Á. S. (2021). *Evaluación de datos satelitales del sensor de calidad de aire TROPOMI - SENTINEL 5P para el Ecuador entre los años 2018 a 2020.*
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20893>

Villa, T. F., Salimi, F., Morton, K., Morawska, L., & Gonzalez, F. (2016). Development and validation of a UAV based system for air pollution measurements. *Sensors*, 16(12), 2202.



- Wintel, J., Hösen, E., Koppmann, R., Krebsbach, M., Hofzumahaus, A., & Rohrer, F. (2013). Stable carbon isotope ratios of toluene in the boundary layer and the lower free troposphere. *Atmos. Chem. Phys*, *13*(21), 11059-11071
- Wivou, J., Udawatta, L., Alshehhi, A., Alzaabi, E., Albeloshi, A., & Alfalasi, S. (2016). Air quality monitoring for sustainable systems via drone based technology. *2016 IEEE International Conference on Information and Automation for Sustainability (ICIAfS)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICIAfS.2016.7946542>
- Xianling, L., Xi, J., y Yixin, Y. (2018). What causes PM2.5 pollution Cross-economy empirical analysis from socioeconomic perspective. *Energy Policy* *119*(10), 458-472
.Recuperado de:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421518302568>
- Yoon, S., & Diaz, P. V. (2018). High-Fidelity Computational Aerodynamics of Multi-Rotor Unmanned Aerial Vehicles. *AIAA SciTech*, 2018-1266.

Anexos



Anexo 1. Ejemplo de Ortofotografía RGB.



Anexo 2. Ejemplo de Ortofotografía NIR.





Anexo 3. Ejemplo de Ortofotografía a partir de fotografías de DRON P4P.



Anexo 4. Ensamble 1, cámara multiespectral en P4P.



Anexo 5. Ensamble 2, cámara multispectral en P4P.



Anexo 6. Estación CCA de monitoreo continuo PM_{2.5}.



Anexo 7. Tesistas.



Anexo 8. Tablas datos para modelos de regresión: Concentración $PM_{2.5}$ y valores de ND.

Fecha	Hora	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Estación CCA	Valor banda Red	Valor banda Green	Valor banda Blue	Valor banda NIR
11 de junio	10:00	17	88	57	80	87
11 de junio	11:00	2	245	224	207	128
11 de junio	12:00	5	167	132	122	66
11 de junio	13:00	4	168	146	137	89
14 de junio	9:00	13	86	56	69	22
14 de junio	10:00	11	156	130	113	37
14 de junio	11:00	10	222	194	181	70
14 de junio	12:00	8	160	123	135	98
14 de junio	13:00	4	254	241	250	107
15 de junio	9:00	9	131	105	102	35
15 de junio	10:00	10	195	167	154	110
15 de junio	11:00	6	250	234	245	94
15 de junio	12:00	3	175	149	138	78
15 de junio	13:00	3	179	165	157	123
21 de junio	9:00	13	169	150	134	68
21 de junio	10:00	8	142	115	108	72



Fecha	Hora	PM_{2.5} (µg/m³) Estación CCA	Valor banda Red	Valor banda Green	Valor banda Blue	Valor banda NIR
21 de junio	11:00	4	134	120	98	99
21 de junio	12:00	5	163	139	125	140
21 de junio	13:00	4	116	105	50	32
22 de junio	9:00	11	189	165	145	82
22 de junio	10:00	15	148	128	122	22
22 de junio	11:00	3	234	193	181	94
22 de junio	12:00	2	122	104	109	118
22 de junio	13:00	0	205	189	171	61
23 de junio	9:00	11	187	164	152	82
23 de junio	10:00	7	136	117	123	68
23 de junio	11:00	1	247	205	189	76
23 de junio	12:00	0	210	188	170	68
23 de junio	13:00	4	254	225	215	140
24 de junio	9:00	18	224	192	176	84
24 de junio	10:00	10	205	187	167	106
24 de junio	11:00	5	253	238	251	113
24 de junio	12:00	1	229	224	232	73



Fecha	Hora	PM_{2.5} (µg/m³) Estación CCA	Valor banda Red	Valor banda Green	Valor banda Blue	Valor banda NIR
24 de junio	13:00	2	195	172	168	91
25 de junio	10:00	12	135	113	112	32
25 de junio	11:00	10	128	119	42	87
25 de junio	12:00	6	250	224	201	137
25 de junio	13:00	6	169	142	135	87
26 de junio	9:00	10	169	150	140	62
26 de junio	10:00	6	166	142	136	49
26 de junio	11:00	6	159	139	130	87
28 de junio	9:00	8	209	172	154	125
28 de junio	10:00	3	222	187	170	105
28 de junio	11:00	0	171	154	136	84
28 de junio	12:00	2	205	188	173	95
28 de junio	13:00	6	156	136	137	128
29 de junio	9:00	11	147	124	115	40
29 de junio	10:00	9	180	153	143	68
29 de junio	11:00	5	191	169	169	135
29 de junio	12:00	4	253	233	210	147





Anexo 9. Tablas de datos para los valores predichos para el modelo A y B

PM_{2.5} (µg/m³)	Valores Predichos (Modelo A) PM_{2.5} (µg/m³)	Valores Predichos (Modelo B) PM_{2.5} (µg/m³)
17,00	10,49428281	7,402335804
2,00	3,285564996	5,279194073
5,00	9,232351485	9,865766787
4,00	6,871386573	5,732039609
13,00	12,31730345	8,387104105
11,00	9,257254834	7,851044752
10,00	6,561398163	8,090752813
8,00	8,768556535	9,46410995
4,00	2,602070111	2,899795656
9,00	10,06986826	7,515382658
10,00	6,212813886	7,294543046
6,00	3,484382841	3,925656337
3,00	7,491408593	7,134046386
3,00	4,527883103	2,892773361



PM_{2.5} (µg/m³)	Valores Predichos (Modelo A) PM_{2.5} (µg/m³)	Valores Predichos (Modelo B) PM_{2.5} (µg/m³)
13,00	7,068483578	5,358432725
8,00	8,789616515	7,300822743
4,00	6,583913118	3,353238123
5,00	5,794628669	5,514851292
4,00	8,692279369	4,14854644
11,00	6,69691353	6,720625978
15,00	9,167942309	6,143872446
3,00	7,163075842	11,45280886
2,00	6,904774719	3,630775971
0,00	5,802174264	4,813664627
11,00	6,62943512	6,277591596
7,00	8,064349947	4,806117324
1,00	7,422121611	12,17547289
0,00	6,214696902	6,440256341
4,00	3,687621451	7,284808178



PM_{2.5} (µg/m³)	Valores Predichos (Modelo A) PM_{2.5} (µg/m³)	Valores Predichos (Modelo B) PM_{2.5} (µg/m³)
18,00	6,605194006	9,06677413
10,00	4,749035121	4,665039766
5,00	2,71340817	3,294641163
1,00	3,322719175	1,083450248
2,00	6,126251562	6,014570232
12,00	9,525075191	6,399002323
10,00	6,474825201	3,104306016
6,00	3,512084485	6,695239602
6,00	7,538547746	7,168780207
10,00	7,242991183	5,349437534
6,00	8,35079404	6,91713228
6,00	6,945487797	5,151320575
8,00	6,504561643	9,779523107
3,00	6,43827477	9,582907297
0,00	6,28710653	4,560019092



PM_{2.5} (µg/m³)	Valores Predichos (Modelo A) PM_{2.5} (µg/m³)	Valores Predichos (Modelo B) PM_{2.5} (µg/m³)
2,00	4,941131783	4,471757026
6,00	5,843552468	4,262128081
11,00	9,058099107	6,751876405
9,00	7,759199705	7,593922761
5,00	4,839406252	4,893468417
4,00	2,363701482	4,817620113