

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERIA, INDUSTRIA
Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DEL
CONTAMINANTE PM_{2,5} EN LA ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE
CUENCA.**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERIA AMBIENTAL**

AUTOR: JONNATHAN PATRICIO REYES REDROVAN

DIRECTOR: BLGO. VINICIO ESTUARDO SANTILLÁN RODRÍGUEZ, PHD

CUENCA - ECUADOR

2023

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DEL
CONTAMINANTE PM_{2.5} EN LA ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE
CUENCA.**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

AUTOR: JONNATHAN PATRICIO REYES REDROVAN

DIRECTOR: BLGO. VINICIO ESTUARDO SANTILLÁN RODRÍGUEZ, PHD

CUENCA - ECUADOR


2023

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

DECLARATORIA DE AUTORIA Y RESPONSABILIDAD

Yo, Jonnathan Patricio Reyes Redrovan portador de la cédula de ciudadanía N° 0106163363. Declaro ser el autor de la obra: “Análisis multitemporal de la concentración del contaminante PM_{2.5} en la zona urbana de la ciudad de Cuenca”, sobre la cual me hago responsable sobre las opiniones, versiones e ideas expresadas. Declaro que la misma ha sido elaborada, respetando los derechos de propiedad intelectual de terceros y eximo a la Universidad Católica de Cuenca sobre cualquier reclamación que pudiera existir al respecto. Declaro finalmente que mi obra ha sido realizada cumpliendo con todos los requisitos legales, éticos y bioéticos de investigación, que la misma no incumple con la normativa nacional e internacional en el área específica de investigación, sobre la que también me responsabilizo y eximo a la Universidad Católica de Cuenca de toda reclamación al respecto.

Cuenca, 20 de noviembre 2023



F:

Jonnathan Patricio Reyes Redrovan

0106163363

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jonnathan Patricio Reyes Redrovan, bajo mi supervisión.



Blgo. Vinicio Estuardo Santillán Rodríguez, PhD

DIRECTOR

DEDICATORIA

Primero que nada quiero agradecer a Dios por permitirme alcanzar otra meta más en la vida, por no abandonarme en los momentos difíciles y por darme la fuerza y el coraje para seguir luchando, a pesar de todas las adversidades que me puso la vida y permitir seguir creciendo como persona.

Este trabajo está dedicado a Jose Rafael Cabrera, quien fue mi inspiración para alcanzar esta meta. Sé que desde el cielo está muy orgulloso de mí. También quiero agradecer a Mi Madre, Neli Angelita Redrovan Redrovan y a mis Hermanos Jefferson Reyes, Fabiola Reyes, Katherine Reyes y Jean Carlos Reyes quienes desempeñaron un papel vital en mi avance y conclusión de mi carrera Universitaria.

A mi Papá Bolívar Reyes, que desde el cielo me cuida y me guía, espero de todo corazón, se sienta orgulloso de su hijo, por alcanzar una meta más en la vida, aunque no compartimos mucho porque Dios lo quiso así, estoy agradecido por haberme dado la vida y que sepa que siempre lo extrañaré y lo tengo presente.

Agradezco a mis abuelitos, Rosa Redrovan, Rosa Reyes y Gonzalo Redrovan, quienes me apoyaron moralmente y siempre creyeron en mí, espero que estén orgullosos de mí por cumplir otra meta más en mi vida.

También quiero agradecer a toda mi familia por todo el amor y su apoyo moral y económico, que me han brindado para lograr una meta más en la vida, siempre creyeron en mí y nunca me abandonaron y espero que estén orgullosos de mí.

AGRADECIMIENTOS

Mi agradecimiento, a Dios, por brindarme la fuerza y la guía durante todo mi proceso académico. Asimismo, quiero agradecer a mis queridos padres por su apoyo moral y económico incondicional a lo largo de mi formación académica.

A mi tutor de tesis, Blgo. Vinicio Santillán, PhD., le agradezco sinceramente por su apoyo moral y por compartir sus amplios conocimientos conmigo. Además, agradezco su aliento en los momentos más difíciles, animándome a seguir adelante con mi proyecto de titulación.

También quiero expresar mis más sinceros agradecimientos al Ing. Manuel Salvador Álvarez Vera, quien fue cotutor de mi trabajo de titulación. Quien brindó su apoyo y conocimientos para orientar mi proyecto.

Quiero expresar mi profundo agradecimiento al Blgo. Danilo Mejía, PhD(c), quien fue asesor de mi trabajo de titulación. Por su continua motivación y orientación durante todo el proceso. Más allá de ser solo un profesor, se ha convertido en un amigo de carrera. Valoraré eternamente su apoyo incondicional.

RESUMEN

Considerando que una de las problemáticas de la salud global es la contaminación del aire por material particulado $PM_{2.5}$, se realizó un análisis de las concentraciones de este contaminante en la zona urbana de la ciudad de Cuenca. A partir de un análisis multitemporal desde el año 2013 al 2022 del contaminante, por medio de la combinación de imágenes multiespectrales de teledetección y las concentraciones de $PM_{2.5}$ de tres estaciones permanentes de la EMOV EP. Se determinó los niveles de alerta, alarma y emergencia establecidos por la normativa ambiental vigente en las diferentes parroquias urbanas de Cuenca. Los valores de concentración más considerables se observaron en las parroquias cercanas al centro histórico de la ciudad, posiblemente a causa de la cantidad de vehículos que transitan en la zona, convirtiéndose en un agente nocivo para la salud de los moradores y comerciantes. Se identificó una tendencia al incremento de la concentración de $PM_{2.5}$, desde el año 2013 al 2022, con un declive en el año 2020, en el que se presentan los niveles mínimos de concentración, posiblemente por las medidas de confinamiento tomadas por la pandemia del COVID-19.

Palabras clave: $PM_{2.5}$, Material Particulado, parroquias, multitemporal, teledetección, estaciones de monitoreo.

ABSTRACT

As one of the global health issues is air pollution due to particulate matter $PM_{2.5}$, an analysis of this pollutant's concentrations was conducted in Cuenca's urban area. Based on multi-temporal research from 2013 to 2022, the study employed a combination of multispectral remote sensing images and $PM_{2.5}$ concentrations from three permanent stations of EMOV EP (Municipal Mobility Company). The levels of alert, alarm, and emergency established by current environmental regulations were determined in the different urban parishes of Cuenca. The most significant concentration values were observed in the parishes near the city's historic center, possibly due to the number of vehicles circulating in the area, making it a harmful agent to the health of residents and merchants. A trend of increasing $PM_{2.5}$ concentration was identified from 2013 to 2022, with a decline in 2020, where minimum concentration levels are presented, possibly because of the confinement measures taken during the COVID-19 pandemic.

Keywords: $PM_{2.5}$, particulate matter, parishes, multitemporal, remote sensing, monitoring stations.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	I
AGRADECIMIENTOS	II
DEDICATORIA	II
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
ÍNDICE DE CONTENIDOS	VI
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABLAS	XI
LISTA DE ANEXOS	XIII
CAPÍTULO I	- 1 -
1. INTRODUCCIÓN	- 1 -
1.1 OBJETIVOS	- 2 -
1.1.1 GENERAL	- 2 -
1.1.2 ESPECÍFICOS	- 2 -
CAPÍTULO II	- 3 -
2. REVISIÓN DE LITERATURA	- 3 -
2.1 LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA	- 3 -
2.2 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LA CIUDAD DE CUENCA	- 3 -
2.3 MATERIAL PARTICULADO 2.5 MM	- 4 -
2.3.1 Fuentes de emisión de Material Particulado $PM_{2.5}$	- 4 -
2.3.2 Efectos del Material Particulado $PM_{2.5}$ en la salud	- 5 -
2.3.3 Efectos del Material Particulado $PM_{2.5}$ en el medio ambiente	- 5 -
2.4 SENSORES REMOTOS	- 5 -
2.5 TELEDETECCIÓN	- 6 -
2.6 ANÁLISIS MULTITEMPORAL	- 6 -
2.7 LEGISLACIÓN AMBIENTAL VIGENTE RELACIONADA CON LA CONTAMINACIÓN DEL AIRE	- 6 -
2.7.1 Constitución de la República del Ecuador	- 6 -
2.7.2 Norma de la calidad del aire	- 7 -
2.7.3 Organización mundial de la salud	- 8 -
CAPÍTULO III	- 9 -
3. MATERIALES Y MÉTODOS	- 9 -
3.1 DELIMITACIÓN DE ZONA DE ESTUDIO	- 9 -
3.2 DATOS DE LA EMOV EP, DE LA CALIDAD DEL AIRE	- 9 -
3.3 IMÁGENES SATELITALES	- 10 -
3.4 ANÁLISIS DE DATOS	- 11 -
CAPÍTULO IV	- 13 -
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	- 13 -
4.1 ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS DATOS DE LA EMOV EP, $PM_{2.5}$ DE LA CALIDAD DEL AIRE	- 13 -
4.2 ANÁLISIS MUTITEMPORAL DE LOS DATOS COMBINADOS DE CONCENTRACIÓN DE $PM_{2.5}$ DE LA EMOV EP E IMÁGENES SATELITALES LANDSAT 8	- 17 -
4.2.1 Análisis multitemporal del contaminante del periodo 2013	- 20 -

4.2.2 Análisis multitemporal del contaminante del periodo 2014	- 23 -
4.2.3 Análisis multitemporal del contaminante del periodo 2015	- 27 -
4.2.4 Análisis multitemporal del contaminante del periodo 2016	- 30 -
4.2.5 Análisis multitemporal del contaminante del periodo 2017	- 32 -
4.2.6 Análisis multitemporal del contaminante del periodo 2018	- 34 -
4.2.7 Análisis multitemporal del contaminante del periodo 2019	- 36 -
4.2.8 Análisis multitemporal del contaminante del periodo 2020	- 39 -
4.2.9 Análisis multitemporal del contaminante del periodo 2021	- 44 -
4.2.10 Análisis multitemporal del contaminante del periodo 2022	- 47 -
4.3 ANÁLISIS DE VARIANZA DE LOS DATOS OBTENIDOS DE LAS IMÁGENES SATELITALES	- 53 -
4.4 DISCUSIÓN	- 55 -
CAPÍTULO V	- 57 -
5. CONCLUSIONES	- 57 -
CAPÍTULO VI	- 59 -
6. RECOMENDACIONES	- 59 -
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	- 60 -
ANEXOS	- 65 -

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de Ubicación de Estaciones de Monitoreos de la Calidad del Aire.....	- 3 -
Figura 2: Módulo principal presenta el mapa de ubicación de las 18 parroquias urbanas de la zona de estudio. Módulo secundario se encuentra la posición del cantón en la provincia del Azuay.	- 9 -
Figura 3: Análisis de varianza TUKEY error 95% de los datos de la EMOV EP por años.....	- 13 -
Figura 4: Análisis de varianza TUKEY error 95% de los datos de la EMOV EP por meses.....	- 14 -
Figura 5: Análisis GAM de la temporalidad por años de concentración.....	- 15 -
Figura 6: Análisis GAM de la temporalidad por meses de concentración.....	- 16 -
Figura 7: Concentración del Material Particulado en el año 04/05/2013, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que están entre los rangos 80.01 - 120 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA.....	- 20 -
Figura 8: Concentración del Material Particulado en el año 08/08/2013, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA.....	- 21 -
Figura 9: Concentración del Material Particulado en el año 28/11/2013, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que sobrepasa los rangos 250.01 - 350 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA.....	- 22 -
Figura 10: Concentración del Material Particulado en el año 04/03/2014, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que sobrepasa los rangos 350.01 - 850 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA.....	- 23 -
Figura 11: Concentración del Material Particulado en el año 06/08/2014, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA.....	- 24 -
Figura 12: Concentración del Material Particulado en el año 26/07/2014, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA.....	- 25 -
Figura 13: Concentración del Material Particulado en el año 30/10/2014, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que sobrepasa los rangos 350.01 - 850 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA.....	- 26 -
Figura 14: Concentración del Material Particulado en el año 13/07/2015, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA.....	- 27 -
Figura 15: Concentración del Material Particulado en el año 15/09/2015, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA.....	- 28 -
Figura 16: Concentración del Material Particulado en el año 02/11/2015, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que están entre los rangos 80.01 - 120 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA.....	- 29 -
Figura 17: Concentración del Material Particulado en el año 05/01/2016, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que están entre los rangos 40.01 - 80 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA.....	- 30 -
Figura 18: Concentración del Material Particulado en el año 20/11/2016, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que están entre los rangos 160.01 - 200 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA.....	- 31 -
Figura 19: Concentración del Material Particulado en el año 20/09/2017, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que están entre los rangos 40.01 - 80 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA.....	- 32 -
Figura 20: Concentración del Material Particulado en el año 09/12/2017, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que sobrepasa los rangos 250.01 - 350 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA.....	- 33 -

Figura 21: Concentración del Material Particulado en el año 10/01/2018, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que están entre los rangos 120.01 - 160 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA	- 34 -
Figura 22: Concentración del Material Particulado en el año 25/10/2018, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que sobrepaso los rangos 350.01 - 1250 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA	- 35 -
Figura 23: Concentración del Material Particulado en el año 29/01/2019, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que sobrepaso los rangos 200.01 - 250 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA	- 36 -
Figura 24: Concentración del Material Particulado en el año 25/08/2019, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que están entre los rangos 80.01 - 120 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA	- 37 -
Figura 25: Concentración del Material Particulado en el año 15/12/2019, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que sobrepaso los rangos 200.01 - 300 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA	- 38 -
Figura 26: Concentración del Material Particulado en el año 21/04/2020, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que sobrepaso los rangos 350.01 - 700 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA	- 39 -
Figura 27: Concentración del Material Particulado en el año 24/06/2020, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA	- 40 -
Figura 28: Concentración del Material Particulado en el año 11/08/2020, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA	- 41 -
Figura 29: Concentración del Material Particulado en el año 27/08/2020, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que están entre los rangos 40.01 - 80 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA	- 42 -
Figura 30: Concentración del Material Particulado en el año 28/09/2020, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que están entre los rangos 80.01 - 120 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA	- 43 -
Figura 31: Concentración del Material Particulado en el año 23/03/2021, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA	- 44 -
Figura 32: Concentración del Material Particulado en el año 27/06/2021, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA	- 45 -
Figura 33: Concentración del Material Particulado en el año 14/08/2021, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA	- 46 -
Figura 34: Concentración del Material Particulado en el año 10/03/2022, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que están entre los rangos 40.01 - 80 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA	- 47 -
Figura 35: Concentración del Material Particulado en el año 17/08/2022, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA	- 48 -
Figura 36: Concentración del Material Particulado en el año 02/09/2022, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA	- 49 -
Figura 37: Concentración del Material Particulado en el año 18/09/2022, (a) Mapa de concentración de PM _{2.5} que están entre los rangos 120.01 - 160 µg/m ³ , (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM _{2.5} de acuerdo al TULSMA	- 50 -

Figura 38: Concentración del Material Particulado en el año 05/11/2022, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 40.01 - 80 µg/m³, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA - 51 -

Figura 39: Concentración del Material Particulado en el año 21/11/2022, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 µg/m³, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA - 52 -

Figura 40: Análisis de varianza TUKEY error 95% de los datos de imágenes satelitales. - 54 -

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de estaciones fijas de PM _{2.5} de la Red de Monitoreo de la EMOV EP.....	- 4 -
Tabla 2: Concentraciones máximas permitidas de concentración de material particulado que se presentan en el aire establecido en el Decreto N° 50 – Norma de Calidad del Aire Ambiente	- 7 -
Tabla 3. Concentraciones de contaminantes comunes que definen los niveles de alerta, de alarma y de emergencia en la calidad del aire	- 8 -
Tabla 4. Nubosidad de imágenes utilizadas para la obtención de información satelital.....	- 10 -
Continuación de la Tabla 4. Imágenes utilizadas para la obtención de información satelital. Muestra el código de la imagen, la fecha, porcentaje de nubosidad en el área de estudio.....	- 11 -
Tabla 5. Área de uso y longitud de onda de bandas espectrales utilizadas	- 11 -
Tabla 6. Rangos máximos y mínimos de dispersión de PM _{2.5} y distribuciones utilizadas para cada fecha en el periodo del 2013 al 2022	- 17 -
Continuación de la Tabla 6. Rangos máximos y mínimos de dispersión de PM _{2.5} y distribuciones utilizadas para cada fecha en el periodo del 2013 al 2022	- 18 -
Continuación de la Tabla 6. Rangos máximos y mínimos de dispersión de PM _{2.5} y distribuciones utilizadas para cada fecha en el periodo del 2013 al 2022	- 19 -
Tabla 7. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 04/05/2013.....	- 20 -
Tabla 8. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 08/08/2013.....	- 21 -
Tabla 9. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 28/11/2013.....	- 22 -
Tabla 10. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 04/03/2014.....	- 23 -
Tabla 11. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 08/06/2014.....	- 24 -
Tabla 12. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 26/07/2014.....	- 25 -
Tabla 13. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 30/10/2014.....	- 26 -
Tabla 14. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 13/07/2015.....	- 27 -
Tabla 15. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 15/09/2015.....	- 28 -
Tabla 16. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 02/11/2015.....	- 29 -
Tabla 17. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 05/01/2016.....	- 30 -
Tabla 18. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 20/11/2016.....	- 31 -
Tabla 19. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 20/09/2017.....	- 32 -
Tabla 20. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 09/12/2017.....	- 33 -
Tabla 21. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 10/01/2018.....	- 34 -
Tabla 22. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 25/10/2018.....	- 35 -
Tabla 23. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 29/01/2019.....	- 36 -

Tabla 24. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 25/08/2019.....	- 37 -
Tabla 25. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 15/12/2019.....	- 38 -
Tabla 26. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 21/04/2020.....	- 39 -
Tabla 27. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 24/06/2020.....	- 40 -
Tabla 28. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 11/08/2020.....	- 41 -
Tabla 29. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 27/08/2020.....	- 42 -
Tabla 30. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 28/09/2020.....	- 43 -
Tabla 31. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 23/04/2021.....	- 44 -
Tabla 32. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 27/06/2021.....	- 45 -
Tabla 33. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 14/08/2021.....	- 46 -
Tabla 34. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 10/03/2022.....	- 47 -
Tabla 35. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 17/08/2022.....	- 48 -
Tabla 36. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 02/09/2022.....	- 49 -
Tabla 37. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 18/09/2022.....	- 50 -
Tabla 38. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 05/11/2022.....	- 51 -
Tabla 39. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 21/11/2022.....	- 52 -

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Combinación de bandas en Landsat 8 para la determinación de las imágenes de concentración de PM _{2.5} en las fechas de análisis	- 65 -
Anexo 2: Código para el análisis en el software R.....	- 69 -

CAPÍTULO I

1. INTRODUCCIÓN

La continua degradación de la calidad del aire es una de las problemáticas ambientales que influyen de manera negativa en todas las ciudades del mundo. El balance energético global del sistema climático se ve directamente afectado por elementos como los gases responsables del efecto invernadero y la concentración de aerosoles como el material particulado (PM), considerándose como una de las fuentes principales del cambio climático (Barra, 2019).

El material particulado ($PM_{2.5}$) es una combinación heterogénea entre partículas líquidas y sólidas suspendidas en la atmósfera, que se encuentran en constante transformación de su composición química en el tiempo y espacio (Escudero, 2017). La contaminación por concentraciones considerables de $PM_{2.5}$ generan una elevada posibilidad de morbilidad y mortalidad en personas vulnerables, como adultos mayores y niños, primordialmente con patologías respiratorias y cardiovasculares (Baena & Campo, 2020). Por lo tanto, teniendo en cuenta que las concentraciones de $PM_{2.5}$ son variables espacialmente, se considera que las estaciones fijas son deficientes para brindar datos de valor de la distribución espacio – temporal de dicha concentración de PM en un alcance urbano, regional o mundial (Galarza & Tinoco, 2022).

En la actualidad, las principales metodologías utilizadas para el monitoreo de contaminantes del aire comprenden mediciones tomadas con estaciones fijas (Cardona, 2021). No obstante, en este momento la tecnología de los sistemas de información geográfica SIG, en conjunto con los procesos de análisis de imágenes determinadas mediante teledetección, han tenido gran aceptación, ya que ofrecen una completa representación gráfica, elevada resolución y una extensa cobertura espacial (López, 2016). Sin embargo, para comprender las tendencias de la contaminación atmosférica en una zona específica, es necesario un análisis más exhaustivo de los datos a lo largo del tiempo, para apreciar las propensiones espacio – tiempo de la contaminación del aire (Feenstra et al., 2020). Por lo cual, es necesario el monitoreo integrando datos de $PM_{2.5}$ en estaciones fijas con datos de teledetección para determinar la concentración del contaminante más allá de los puntos de monitoreo (García, 2018).

Las parroquias urbanas de la ciudad de Cuenca se han visto afectadas por la contaminación ambiental debido al crecimiento indiscriminado de la población y del parque automotor. Una de las fuentes más importantes del $PM_{2.5}$ es el tubo de escape de los vehículos. Realizar el análisis multitemporal en función de los datos de la concentración de este contaminante atmosférico de estaciones fijas de la red de monitoreo de EMOV EP e imágenes satelitales de Landsat, es indispensable para una mejor interpretación de la tendencia, tiempo y espacio de este. El análisis multitemporal de $PM_{2.5}$ en la ciudad de Cuenca permite conocer los niveles de concentración entre los años 2013 al 2022 y determinar las parroquias urbanas que presentan rangos de concentración que sobrepasan lo establecido en la normativa ambiental vigente. Lo que facilitará la elaboración de políticas por parte de los organismos competentes, con el objetivo de minimizar la problemática que suscita en la salud de la población las altas concentraciones del material particulado, dado que la exposición a $PM_{2.5}$ está directamente relacionado con la morbilidad por enfermedades respiratorias y cardiorrespiratorias.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 General

Analizar de forma multitemporal la concentración del contaminante $PM_{2.5}$ en la zona urbana de la ciudad de Cuenca, mediante un análisis de los datos de las estaciones de la EMOV EP y las imágenes de teledetección entre los años 2013 a 2022, para comparar con la normativa legal vigente.

1.1.2 Específicos

- Constatar la concentración de Material Particulado 2.5 en las estaciones permanentes de la EMOV EP entre los años 2013 a 2022, mediante el análisis de imágenes satelitales para conocer la variación $PM_{2.5}$ en el transcurso del tiempo.
- Establecer la correlación entre los valores de $PM_{2.5}$ de las estaciones de la EMOV EP con las diferentes bandas de las imágenes multiespectrales de la plataforma Landsat 8, mediante software específico tendiente a la comparación de $PM_{2.5}$ en el periodo establecido.
- Comparar la concentración de $PM_{2.5}$ con la normativa legal vigente del Acuerdo Ministerial 097-A, Anexo 4 de Límites máximos permisibles en la zona urbana de la ciudad de Cuenca.

CAPÍTULO II

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 La contaminación atmosférica

Una de las principales problemáticas a las que se ven expuestas las ciudades, regiones y países es la contaminación del aire, por lo tanto, con la finalidad de garantizar su mitigación o erradicación, tanto los investigadores como directivos le prestan primordial atención a nivel mundial (Valdés, 2019). La existencia de contaminantes en el aire en concentraciones que generarían daño en la salud humana o en el ecosistema se le conoce como contaminación atmosférica (Ubilla & Yohannssen, 2017). Generalmente, los contaminantes que se detectan en la atmósfera son ozono, dióxido de sulfuro, monóxido de carbono, butadieno, plomo, benceno, humo de motores a Diesel y material particulado; cuyas fuentes varían desde procesos industriales, centrales eléctricas a base de carbón, vehículos a pequeñas fuentes como tintorerías de limpieza en seco (Estrada et al., 2016).

2.2 Contaminación atmosférica en la ciudad de Cuenca

En la ciudad de Cuenca - Ecuador, desde hace unos años la evolución tecnológica, el incremento poblacional y el empleo del transporte a motor han provocado la creciente contaminación del aire (Palacios & Moreno, 2022). La ciudad goza de una “Red de Monitoreo de la Calidad del Aire” que emprendió sus actividades desde el 2007, y está constituida por 3 puntos de monitorización extendidos en varios sitios de la ciudad (Corral, 2017); y desde septiembre del 2012 se incorpora la estación automática de calidad del aire y de meteorología. Registrando en vivo la concentración de los principales contaminantes (SO_2 , O_3 , CO , $\text{PM}_{2.5}$ y NO_2) (EMOV EP, 2021).

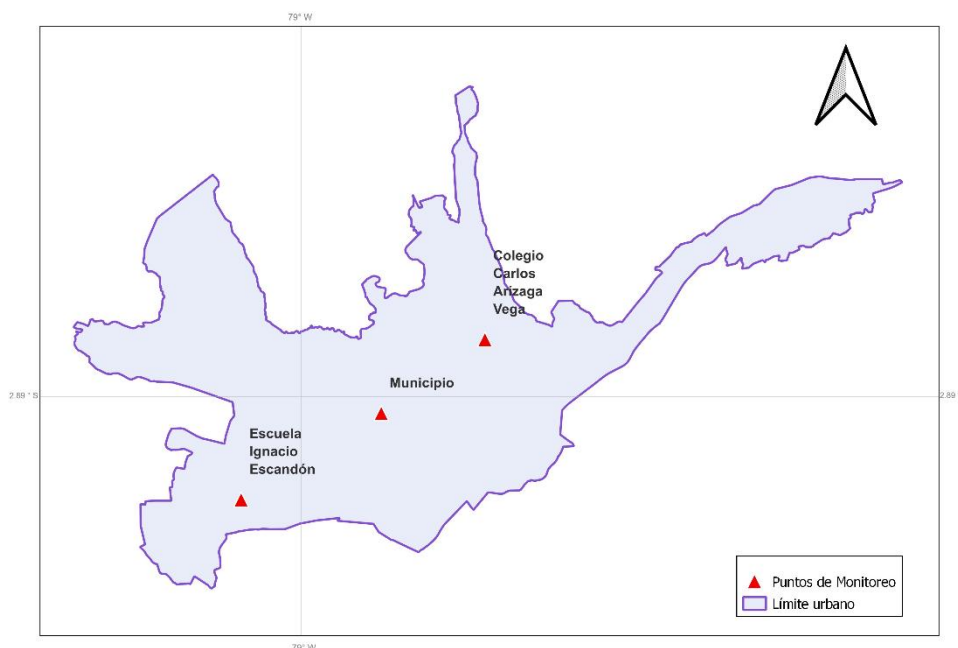


Figura 1: Mapa de Ubicación de Estaciones de Monitoreos de la Calidad del Aire.

Fuente: Autor

En la zona urbana de la ciudad se ubican tres estaciones de monitoreo fijas que poseen datos desde el año 2013 que se observan en la Figura 1, de las cuales sus coordenadas se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Características de estaciones fijas de PM_{2.5} de la Red de Monitoreo de la EMOV EP.

COORDENADAS DE LA UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES				
CÓDIGO	NOMBRE	UBICACIÓN	LATITUD	LONGITUD
CCA	Colegio Carlos Arizaga Vega	Calle J. Lavalle y Calle A. Ricaurte	-2.88°	-78.98°
MUN	Municipio	Calle Simón Bolívar y Calle Presidente Borrero	-2.89°	-79.00°
EIE	Escuela Ignacio Escandón	Av. Loja y Calle Ignacio de Rocha	-2.91°	-79.03°

Fuente: (EMOV EP, 2021)

La ineficaz combustión de los automóviles y su gran incremento, el crecimiento industrial y la carente preocupación en la ejecución de obras públicas, son los causantes principales de la contaminación del aire en la ciudad. Tomar medidas como publicitar el uso de transporte público, la implantación de políticas de monitoreo y control de emisiones de los automotores, el uso de energías limpias y la sensibilización respecto a la importancia de disminuir la polución en el aire, son fundamentales para minimizar dicha problemática para garantizar una buena salud de la población cuencana (Peña, 2017). En una investigación realizada entre los años 2009 a 2013 sobre la polución del aire en la ciudad de Cuenca se determinó que la continua exposición al PM_{2.5} incrementa la probabilidad en un 3% al 9% de padecer cáncer al pulmón y patologías cardio-pulmonares (Palacios & Espinoza, 2014).

2.3 Material Particulado 2.5 µm

La legislación ambiental actual TULSMA, expone que el material particulado está “constituido por material sólido o líquido en forma de partículas, con excepción del agua no combinada, presente en la atmósfera” (Texto Unificado de Legislación Secundaria Del Ministerio Del Ambiente, 2017). Una de las fuentes principales de emisión de PM_{2.5} son las actividades humanas como tránsito vehicular y la industria que conjuntamente con la topografía y el clima de la zona, variando su comportamiento de manera temporal en la atmósfera (Arrieta, 2016). En adición, el material particulado es uno de los productos fundamentales de los procedimientos de combustión en el motor de los automóviles. Causante de varias enfermedades pulmonares, disminución del aparato respiratorio, deterioro de enfermedades crónicas pulmonares y fallecimiento anticipado por patologías respiratorias y cardiovasculares (Cuesta-Santos et al., 2020). La concentración de este contaminante depende directamente de la humedad relativa y la precipitación de la zona de estudio, teniendo en cuenta que en ciudades de alturas mayores a 3000 metros sobre el nivel del mar la concentración es mayor debido la baja densidad del aire (Warthon et al., 2023).

2.3.1 Fuentes de emisión de Material Particulado PM_{2.5}

a. Fuentes de emisión artificial

También conocido como fuentes antropogénicas o primarias, son generadas en particular por el hollín de los autos, o el desgaste de los neumáticos. Otra importante fuente es la actividad industrial, especialmente las relacionadas con el consumo de combustibles fósiles, carbón y gasolina (Córdova-Mendoza et al., 2021). En términos generales, las fuentes de contaminación en las ciudades se dan por las condiciones meteorológicas, industrialización, crecimiento demográfico y densidad del tráfico vehicular (Gómez, 2017).

b. Fuentes de emisión natural

Denominadas también fuentes secundarias, el material particulado puede ser resultado de la actividad típica del funcionamiento de la vida; como las partículas del suelo transportadas por el viento como polen, esporas, actividad volcánica, fracción de sal marina que se genera de la evaporación del agua, residuos de hojas, piel y plumaje y excremento en el aire (Córdova-Mendoza et al., 2021).

2.3.2 Efectos del Material Particulado PM_{2.5} en la salud

El estar expuesto al material particulado está directamente relacionada con efectos negativos en la salud, ya que se han vinculado al incremento de fallecimientos de la población, contribuyendo al desarrollo de patologías respiratorias y cardiovasculares; particularmente en niños, mujeres en etapa de gestación y personas de edad avanzada (Felipe, 2022).

El material particulado es factor de riesgo ambiental significativo con respecto a las patologías, originadas por el desequilibrio inmunológico. Varios estudios de investigación médica apuntan al PM como el causante del aumento de morbilidad pulmonar, e incremento de rinitis alérgica, asma y cáncer al pulmón, principalmente en áreas urbanas industrializadas (Gutierrez et al., 2012). Cabe mencionar que en autopsias realizadas a residentes de zonas urbanas industrializadas se ha detectado que aproximadamente el 96% de partículas encontradas en los pulmones poseen un diámetro de menos a 2,5 pm (Matus & Oyarzún, 2019). Por lo tanto, vivir en una zona que posee emisiones altas de material particulado genera la retención de una cantidad significativa de partículas en los pulmones. Algunas de ellas suponen ser resultado de la combustión, lo cual fue identificado mediante la comparación de la función pulmonar de habitantes de la ciudad México y Vancouver (Matus & Oyarzún, 2019). La persistente respiración de una atmósfera contaminada reduce el proceso de depuración de los pulmones, propiciando a que una cantidad significativa de partículas lleguen a las zonas inferiores del pulmón; favoreciendo al desarrollo de patologías respiratorias como Enfisema, Bronquitis y Cáncer. Particularmente las partículas cuyo diámetro sea menor a 2,5 micras, ya que son capaces de llegar a los alvéolos, donde el proceso de supresión que lleva a cabo el cuerpo humano puede tardar semanas, meses o años (Cruz & Jiménez, 2016).

2.3.3 Efectos del Material Particulado PM_{2.5} en el medio ambiente

El contaminante PM_{2.5} puede causar impactos negativos en el entorno como:

- La disminución de la visibilidad en el aire, afectando a su vez la claridad del paisaje y la apariencia de la ciudad (Environmental Protection Agency (EPA), 2023).
- El contaminante PM_{2.5} contribuye a la aparición de la lluvia ácida, lo que ocasiona daños en los ecosistemas y edificaciones (Apte et al., 2018).
- Afección a la vegetación al bloquear los poros de las hojas y disminuir la capacidad las plantas de llevar a cabo la fotosíntesis, lo que genera un limitado crecimiento y desarrollo de la vegetación (Moscoso-Vanegas et al., 2019).
- La contaminación del agua y el suelo, debido a que el material particulado de diámetro menor a 2.5 micras dependiendo de su composición química, puede ocasionar alteración en el suelo y en los ecosistemas acuáticos, ya que puede ser transportado por el viento y depositarse en los diferentes cuerpos de agua (Environmental Protection Agency (EPA), 2023).

2.4 Sensores remotos

Los sensores remotos se encuentran monitoreando continuamente la atmósfera planetaria y generando una extensa cantidad de información de los contaminantes atmosféricos (Arboleda & Neto, 2021). Los sensores capturan información a partir de la detección de radiación electromagnética en diversas longitudes de onda, que después puede ser procesada y analizada

para identificar los contaminantes específicos y su concentración, estos datos son obtenidos para ser contrastados con los estándares y directrices fijados en la normativa (Salgado et al., 2017).

En la ciudad de Cuenca desde el año 2005 se utilizaron sensores pasivos para el control de la calidad del aire (Sellers & Espinoza, 2017), más tarde en el año 2017 se impulsó un sistema de monitoreo de calidad de aire y ruido ambiental fundamentado en sensores remotos para determinar índices referenciales de polución en la atmosfera (Salgado et al., 2017).

2.5 Teledetección

Es la ciencia de recopilar, se basa en un sistema de recepción de datos de un área, objeto o fenómeno, a partir de la evaluación de los mismos por medio de un dispositivo que no posee un vínculo directo con el ámbito a ser estudiado, se sustenta en la naturaleza de la radiación electromagnética y en su interrelación con el entorno (Romero, 2016). Los satélites de teledetección son diseñados especialmente para compilar datos sobre la tierra, los cuales pueden medir la concentración de gases y partículas en el aire, ofreciendo información significativa de la calidad del aire (Frackiewicz, 2023a).

La teledetección es utilizada para identificar las fuentes de contaminación del aire, como emisiones de automotores e industrias, a partir de la detección de gases y partículas en el aire (Frackiewicz, 2023). Con el objetivo de analizar la polución de la atmosfera y su impacto en la salud y los ecosistemas, dicha información recopilada se utiliza para generar mapas de contaminación y para detectar las áreas más perjudicadas por la mala calidad del aire (Bernal, 2019).

2.6 Análisis multitemporal

El análisis multitemporal es una técnica empleada en la interpretación de imágenes satelitales para examinar modificaciones en la faz de la tierra en el transcurso del tiempo. Este método consiste en el uso de imágenes de distintas fechas para comparar y analizar los cambios en la vegetación, desarrollo urbano, erosión del suelo, partículas en el aire y otras (Rendón, 2020). La información recolectada en este análisis es utilizada para monitorear y controlar de manera eficiente los recursos naturales y en la elaboración de políticas en la gestión ambiental y planificación urbana (Ochoa, 2023).

Una de las herramientas fundamentales para el análisis multitemporal es la teledetección, ya que permite la captura de imágenes satelitales en diversas fechas y la comparación de estas imágenes permiten identificar los cambios en la superficie terrestre (Puentes & Solarte, 2023). Por ejemplo, los análisis multitemporales por teledetección permiten examinar la disminución de cobertura vegetal por minería ilegal (Rendón, 2020).

2.7 Legislación ambiental vigente relacionada con la contaminación del aire

2.7.1 Constitución de la República del Ecuador

En el Art. 3, numeral 7 de la constitución, se establece que salvaguardar el patrimonio natural del país debe ser prioridad del Estado (Constitución de La República Del Ecuador, 2008). En el Art. 14, se señala “el derecho del pueblo ecuatoriano a vivir en un entorno sano y ecológicamente equilibrado, que asegure la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay*; e informa que es de interés público la conservación del ambiente, la preservación de los ecosistemas, la protección contra el daño ambiental y la rehabilitación de los espacios naturales deteriorados (Constitución de La República Del Ecuador, 2008). En el Art. 66, numeral 27, el Estado reconoce y garantiza a las personas el derecho a vivir en un ambiente limpio, ecológicamente equilibrado, exento de contaminación y en armonía con la naturaleza” (Constitución de La República Del Ecuador, 2008). En el Art. 276, numeral 4, “identifica como uno de los propósitos del sistema de desarrollo, el restablecer y preservar la naturaleza y mantener un ambiente limpio y sustentable que asegure a la población y

colectividades el acceso justo, continuo y de calidad al agua, aire y suelo, y a las ventajas de los recursos del subsuelo y del patrimonio natural” (Constitución de La República Del Ecuador, 2008).

2.7.2 Norma de la calidad del aire

Norma de Calidad del Aire Ambiente, establecida en el Anexo 4, Libro VI de la Calidad Ambiental del Texto Unificado de la Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, emitida por medio del Registro Oficial Suplemento 2 de 31 de marzo de 2003 (última modificación 14 de agosto de 2012), tiene como objetivo resguardar la salud de la población, la calidad del aire, la preservación de los ecosistemas y el ambiente en general.

De manera general, en el literal 4.1.1 De los contaminantes de aire, se presentan los contaminantes comunes de la atmósfera y las máximas concentraciones permitidas en el ambiente, que, en el caso del Material particulado menor a 2,5 micrones, “se establece que la media aritmética de la concentración del contaminante de todas las muestras de un año no debe sobrepasar de 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Mientras que la concentración máxima en un día (24 horas), de todas las muestras recolectadas, no debe sobrepasar los 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, se considera que excede la norma de calidad del aire para PM_{2.5} cuando el percentil 98 de la concentración de 24 horas tomadas en un año en cualquier estación de monitoreo sea igual o mayor que 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ” (Texto Unificado de Legislación Secundaria Del Ministerio Del Ambiente, 2017). Como se indica en la siguiente tabla, de acuerdo a lo establecido en el Decreto N° 50 - Norma de Calidad del Aire Ambiente de los valores máximos permisibles de concentración de material particulado que se encuentra en el aire.

Tabla 2: Concentraciones máximas permitidas de concentración de material particulado que se presentan en el aire establecido en el Decreto N° 50 – Norma de Calidad del Aire Ambiente

CONTAMINANTE	TIEMPO DE EXPOSICIÓN	MAXIMA CONCENTRACION PERMITIDA
PM ₁₀	1 año	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	24 horas	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
PM _{2.5}	1 año	15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
	24 horas	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Partículas Sedimentables	30 días	1 $\text{mg}/\text{cm}^3/\text{mes}$

Fuente: (Texto Unificado de Legislación Secundaria Del Ministerio Del Ambiente, 2017)

Del literal 4.1.3 de la Norma de calidad del aire define que “los planes para los estados de alerta, alarma y emergencia de la calidad del aire será determinada por la autoridad ambiental responsable que sea acreditada por el SUIA, fundamentado en la determinación de tres niveles de concentración que a su vez establecerá la presencia de dichos estados” (Texto Unificado de Legislación Secundaria Del Ministerio Del Ambiente, 2017).

En el literal 4.1.3.2 se establece “los niveles de alerta, alarma y emergencia correspondientes a la calidad del aire en distintos periodos de tiempos. Cada uno de los niveles serán indicados por la Entidad Ambiental de Control cuando uno o más de los contaminantes atmosféricos exceda la concentración que se establece en la Tabla 3. Se debe tener en cuenta que los valores de concentración se encuentran expresados en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, a condiciones de 25 C y 760 mm Hg” (Texto Unificado de Legislación Secundaria Del Ministerio Del Ambiente, 2017).

Tabla 3. Concentraciones de contaminantes comunes que definen los niveles de alerta, de alarma y de emergencia en la calidad del aire

CONTAMINANTE PERÍODO DE TIEMPO	ALERTA	ALARMA	EMERGENCIA
Monóxido de Carbono Concentración promedio en ocho horas	15 000	30 000	40 000
Oxidantes Fotoquímicos, expresados como ozono Concentración promedio en una hora	300	600	800
Óxidos de Nitrógeno, como NO ₂ Concentración promedio en una hora	1 200	2 300	3 000
Dióxido de Azufre Concentración promedio en veinticuatro horas	800	1 600	2 100
Materia Particulado PM ₁₀ Concentración en veinticuatro horas	250	400	500
Material Particulado PM _{2.5} Concentración en veinticuatro horas	150	250	350

Fuente: (Texto Unificado de Legislación Secundaria Del Ministerio Del Ambiente, 2017)

Para el nivel de alerta se debe comunicar a la población, a través de medios de difusión de dicho estado. Así también se debe limitar la circulación vehicular y la actividad de las fuentes fijas de combustión en el área. En el nivel de alarma se debe notificar a la ciudadanía por medio de la prensa, al igual que reducir e inclusive impedir el tráfico vehicular y la actividad de las fuentes fijas de combustión en el sitio. Para el nivel de emergencia se debe realizar la difusión en los medios de comunicación y la prohibición del tráfico vehicular, así como la actividad de fuentes fijas de combustión de la zona en la que está confirmado el nivel de emergencia.

2.7.3 Organización mundial de la salud

En el Resumen Ejecutivo de las Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire del año 2021, cuyo objetivo principal es “proporcionar orientaciones cuantitativas relativas a la salud para el manejo de la calidad del aire. Expresadas como concentraciones a corto y largo plazo de los contaminantes atmosféricos. Establece directrices que se vinculan a riesgos considerables para la salud pública. Las directrices proporcionan a los Estados miembros de la OMS herramientas para orientar a la elaboración de leyes y políticas a reducir los niveles de contaminantes atmosféricos” (Organización Mundial de la Salud, 2021).

CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Delimitación de zona de estudio

El análisis multitemporal del contaminante $PM_{2.5}$ se llevará a cabo en las parroquias urbanas de la ciudad de Cuenca, en la provincia del Azuay, la cual cuenta con 505.585 habitantes en el último censo realizado en el año 2010. El área urbana se encuentra a 2.550 msnm, presentando temperatura promedio de 15 grados centígrados durante el año (Bailón, 2018). En la Figura 2 se presentan la zona urbana perteneciente al cantón Cuenca a ser estudiada, que posee un área aproximada de 70,59 km².

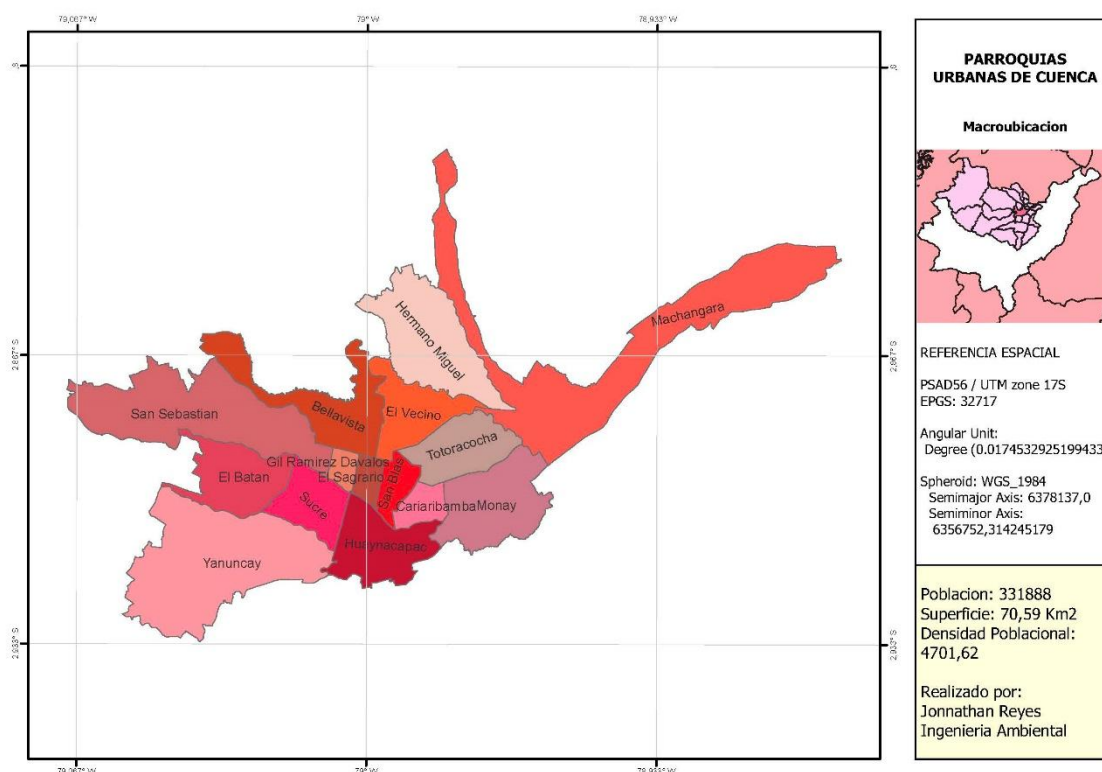


Figura 2: Módulo principal presenta el mapa de ubicación de las 18 parroquias urbanas de la zona de estudio. Módulo secundario se encuentra la posición del cantón en la provincia del Azuay.

Fuente: Autor

3.2 Datos de la EMOV EP, de la calidad del aire

En esta etapa se obtuvo los datos de concentración del material particulado con diámetro menor a 2.5 micrómetros de las tres estaciones de monitoreo de la EMOV EP, mediante una solicitud en las oficinas de la Empresa Municipal. Las estaciones de monitoreo almacenan los datos en formato CSV y XLSX, en intervalos de 1 segundo. Se obtuvieron, 87657 datos de $PM_{2.5}$ entre los años 2013 a 2022 de las estaciones fijas ubicadas en CCA (Colegio Carlos Arizaga Vega), MUN (Municipio) y EIE (Escuela Ignacio Escandón). Estas estaciones presentaron algunos datos anómalos, por lo cual fue imprescindible la validación de estos, eliminando datos iguales a 0 y los NA, con lo que se determinó, 79284 datos de concentración de $PM_{2.5}$ para ser analizados.

3.3 Imágenes satelitales

Después se realizó la descarga de las imágenes satelitales Landsat 8 L2 del Servicio Geológico y la Agencia Espacial (USGS y NASA) en el periodo 2013 a 2022. A partir de la herramienta Earth Explorer, recuperando imágenes cuya cobertura de nubes sea menor al 60%. El satélite Landsat 8 fue lanzado el 20 de mayo del 2013, y cuenta con dos sensores de observación terrestre OLI y TIRS (Yáñez, 2019). El objetivo del Landsat 8 es ser un mecanismo único de recolección periódica de datos en formato de imágenes multiespectrales que sirva en el área de agricultura, geociencia, sector forestal, planificación regional, educación, cartografía y el estudio del cambio climático global. Las imágenes obtenidas se cambiaron de sistema de referencia a WGS 84. Las imágenes seleccionadas para la investigación se presentan en la Tabla 4, empleando 33 imágenes para realizar este análisis.

Tabla 4. Nubosidad de imágenes utilizadas para la obtención de información satelital.

CÓDIGO	FECHA	NUBOSIDAD	NUBOSIDAD EN ÁREA DE ESTUDIO
LC80100622013124LGN02	5/4/2013	59,86%	20%
LC80100622013220LGN01	8/8/2013	37,39%	15%
LC80100622013332LGN01	28/11/2013	36,91%	0%
LC80100622014063LGN01	3/4/2014	58,61%	10%
LC80100622014159LGN01	6/8/2014	56,76%	10%
LC80100622014207LGN01	26/07/2014	42,77%	5%
LC80100622014303LGN01	30/10/2014	37,52%	10%
LC80100622015194LGN01	13/07/2015	12,00%	1%
LC80100622015258LGN01	15/09/2015	32,22%	9%
LC80100622015306LGN01	11/2/2015	44,37%	19%
LC80100622016005LGN02	1/5/2016	55,31%	30%
LC80100622016325LGN01	20/11/2016	27,76%	7%
LC80100622017263LGN00	20/09/2017	34,19%	11%
LC80100622017343LGN00	12/9/2017	58,18%	33%
LC80100622018010LGN00	1/10/2018	58,93%	35%
LC80100622018298LGN00	25/10/2018	55,93%	30%
LC80100622019029LGN00	29/01/2019	57,84%	31%
LC80100622019237LGN00	25/08/2019	45,25%	19%
LC80100622019349LGN01	15/12/2019	57,18%	33%
LC80100622020112LGN00	21/04/2020	30,20%	9%
LC80100622020176LGN00	24/06/2020	42,79%	18%
LC80100622020224LGN00	8/11/2020	38,18%	14%
LC80100622020240LGN00	27/08/2020	32,59%	10%
LC80100622020272LGN00	28/09/2020	59,17%	34%
LC80100622021082LGN00	23/03/2021	56,11%	31%
LC80100622021178LGN00	27/06/2021	55,84%	30%
LC80100622021226LGN00	14/08/2021	60,00%	35%
LC80100622022069LGN00	3/10/2022	32,20%	9%
LC80100622022229LGN00	17/08/2022	54,23%	28%
LC80100622022245LGN00	9/2/2022	38,30%	13%
LC80100622022261LGN00	18/09/2022	43,06%	17%
LC80100622022309LGN00	11/5/2022	51,19%	25%

Continuación de la Tabla 4. Imágenes utilizadas para la obtención de información satelital. Muestra el código de la imagen, la fecha, porcentaje de nubosidad en el área de estudio.

CÓDIGO	FECHA	NUBOSIDAD	NUBOSIDAD EN ÁREA DE ESTUDIO
LC80100622022325LGN00	21/11/2022	42,25%	16%

Fuente: (USGS, 2023)

Se realizó la corrección de la topografía con el objetivo de erradicar la incidencia de sombras y relieve, principalmente en áreas con pendientes pronunciadas. Adecuando los valores de reflectancia normalizada de acuerdo a la composición de valores de pendiente, ángulo de orientación de la propiedad y geometría del sol al instante de la toma de la imagen. La verificación de las imágenes satelitales de cada fecha se realizó, usando el modelo digital del terreno MDT y la pendiente y aspecto combinados con los valores de la elevación de Sunelev y Sunazimut del sol de cada imagen.

3.4 Análisis de datos

Todos los análisis se realizaron en los programas de acceso libre R 4.3 y QGIS 3.32.0 Lima. Se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) de los datos de concentración de PM_{2.5} obtenidos de la EMOV EP desde el año 2013 al 2022, en función de la prueba estadística Tukey, con lo que se creó intervalos de confianza para identificar la varianza entre los promedios. Se realizó el análisis de las concentraciones de PM_{2.5} anuales, utilizando GAM (Modelo Aditivo Generalizado) que permitió modelar de forma automática las relaciones no lineales, junto con el error estándar para estimar la media de las concentraciones anuales, obteniendo la variación de las concentraciones anuales con respecto a la media. De la misma manera se llevó a cabo el análisis de las concentraciones de PM_{2.5} de los meses del año, para determinar la variación mensual de PM_{2.5}.

La elaboración de los modelos de regresión lineal múltiple se realizó mediante combinaciones de los datos de concentración de PM_{2.5} procedente de la información obtenida en la EMOV EP y del procesamiento de las imágenes satelitales de Landsat 8 para identificar la combinación más factible. Los sensores del Landsat 8 se manejan de conformidad con la luz visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta. Las bandas están establecidas en función a la longitud de onda de su enfoque (Tabla 5).

Tabla 5. Área de uso y longitud de onda de bandas espectrales utilizadas.

SENSOR	BANDA ESPECTRAL	ÁREA DE USO	LONGITUD DE ONDA	RESOLUCIÓN
OLI	Banda 1	Ultra Azul Coastal Aerosol	0.433 – 0.453 μm	30 m
OLI	Banda 2	Azul	0.450 – 0.515 μm	30 m
OLI	Banda 3	Verde	0.525 – 0.600 μm	30 m
OLI	Banda 4	Rojo	0.630 – 0.680 μm	30 m
OLI	Banda 5	Infrarrojo Cercano NIR	0.845 – 0.885 μm	30 m
OLI	Banda 6	Infrarrojo de onda corta	1.560 – 1.660 μm	30 m

Fuente: (Gómez et al., 2013)

En función de la combinación de las bandas se determinó los modelos de forma manual, escogiendo los más factibles para el análisis de cada año. Para determinar las medidas de dispersión de los datos de PM 2.5 se utilizó un modelo lineal (LM) asumiendo una distribución de error Poisson (F2, F4, F5, F6, F7, F8, F13, F14, F15, F18, F19, F20, F21, F22, F26, F27, F28, F30, F31, F32) y una distribución de error Quasipoisson (F1, F3, F9, F10, F11, F12, F16, F17, F23, F24, F25, F29, F33) debido a la sobre dispersión de los datos.

El modelo de regresión consiste en un modelo lineal que en conjunto con una serie de variables que favorecen la estimación de la variable independiente, que para este caso en la concentración de $PM_{2.5}$ de los datos de la EMOV EP. Para la ejecución de las nuevas imágenes se utilizó la Ecuación 1, determinando las concentraciones de $PM_{2.5}$ en función de las bandas de Landsat 8 y la intersección de las pendientes de los datos significativos.

$$PM_{2.5} = I_0 + P_1B_1 + P_2B_2 + \dots + P_6B_6 \quad (1)$$

En donde,

$PM_{2.5}$: Concentraciones

I_0 : Intersección

P_1 : Pendientes

B_1 : Variables independientes (Bandas de Landsat 8)

Para finalizar se realizó un (ANOVA) análisis de varianza en función de la prueba Tukey, entre los datos de concentración de $PM_{2.5}$ determinados mediante la combinación de la información de la EMOV EP y de las imágenes satelitales Landsat 8. El análisis en cuestión tiene como objetivo contrastar las hipótesis previamente consideradas inválidas, las cuales sostenían que las medidas de concentración eran análogas. En contraposición, se plantea la premisa alternativa de que al menos uno de los valores de concentración difiere significativamente de los demás en lo que respecta a su valor previsible. Este análisis se convierte en una herramienta esencial para evaluar la validez de las hipótesis, permitiendo una comprensión más profunda de las relaciones y disparidades en las medidas de concentración, lo que a su vez puede tener implicaciones significativas en la toma de decisiones y en la interpretación de datos relacionados con la concentración

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis de varianza de los datos de la EMOV EP, $PM_{2.5}$ de la calidad del aire

Se obtuvieron 87657 datos de concentración de $PM_{2.5}$. Después de la limpieza de información se obtuvieron, un total de 79284 datos para el análisis. En la que se pudo observar que entre 2017-2016, 2018-2016, 2018-2017 y 2022-2018 las concentraciones de $PM_{2.5}$ fueron similares. Esto muestra que la mayoría de los años presentan concentraciones que difieren estadísticamente (Figura 3).

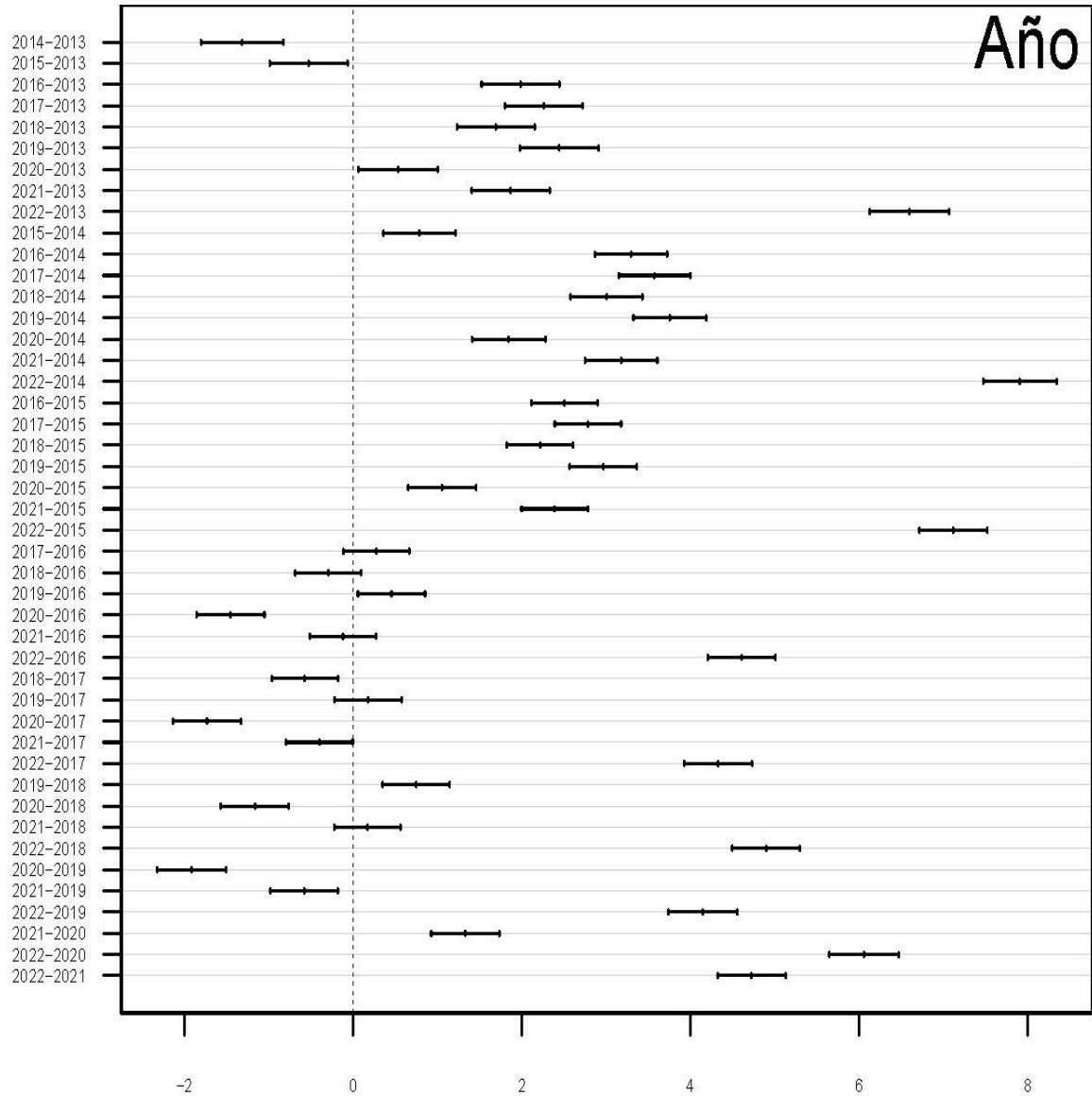


Figura 3: Análisis de varianza TUKEY error 95% de los datos de la EMOV EP por años.

Fuente: Autor

Se llevó a cabo una prueba ANOVA de las concentraciones de $PM_{2.5}$ de los meses del año. En la que se pudo observar que entre mayo-enero, noviembre-enero, marzo-febrero, mayo-febrero, noviembre-febrero, abril-marzo, diciembre-marzo, noviembre-mayo, junio-julio y noviembre-octubre las concentraciones de $PM_{2.5}$ fueron similares. Esto muestra que la mayoría de los meses del año presentan concentraciones que difieren estadísticamente (Figura 4).

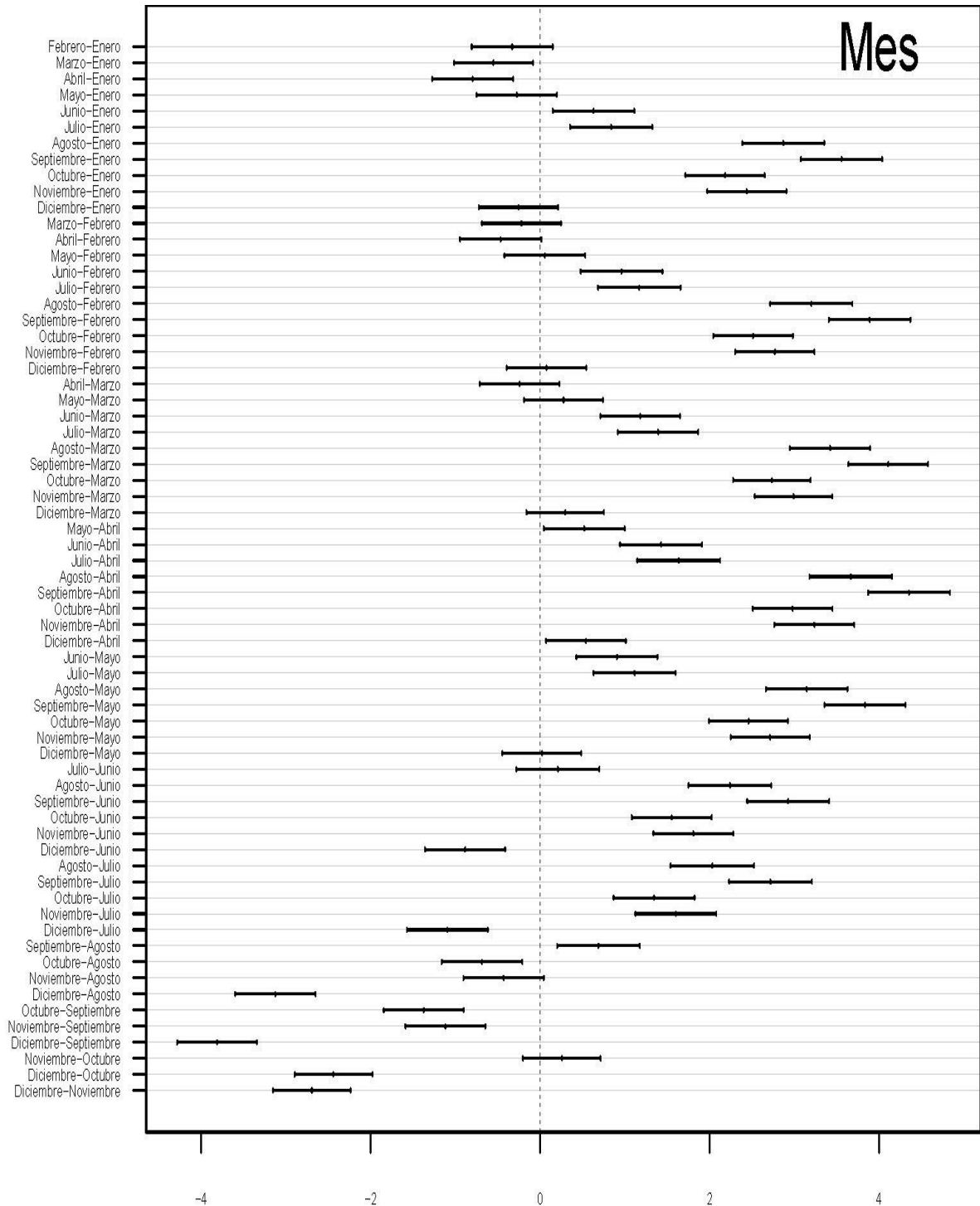


Figura 4: Análisis de varianza TUKEY error 95% de los datos de la EMOV EP por meses.

Fuente: Autor

Asimismo, en la Figura 5 se observa que la variación anual de las concentraciones de la $PM_{2.5}$. Se muestra que existe variación con incrementos y caídas de la concentración desde el año 2013 al 2022. Sin embargo, se puede observar la tendencia al incremento anual del contaminante.

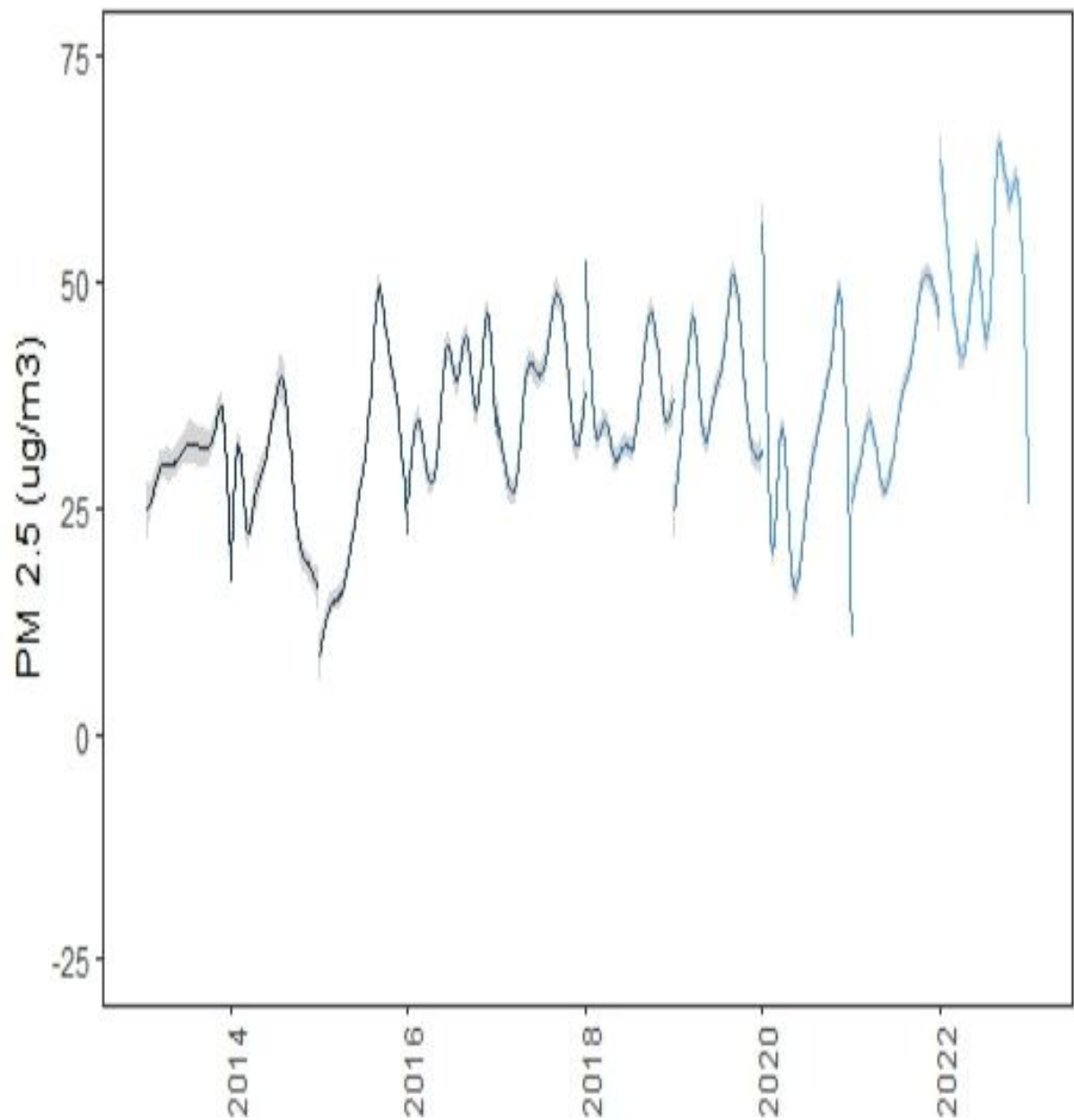


Figura 5: Análisis GAM de la temporalidad por años de concentración

Fuente: Autor

Asimismo, en la Figura 6 se presenta la variación mensual de la concentración de $PM_{2.5}$. Se encuentra poco significativa de las concentraciones de la $PM_{2.5}$ en comparación al último año. Se muestra que existe variación con incrementos mínimos, con una caída de la concentración en el año 2022. Sin embargo, se puede establecer la tendencia al incremento del contaminante.

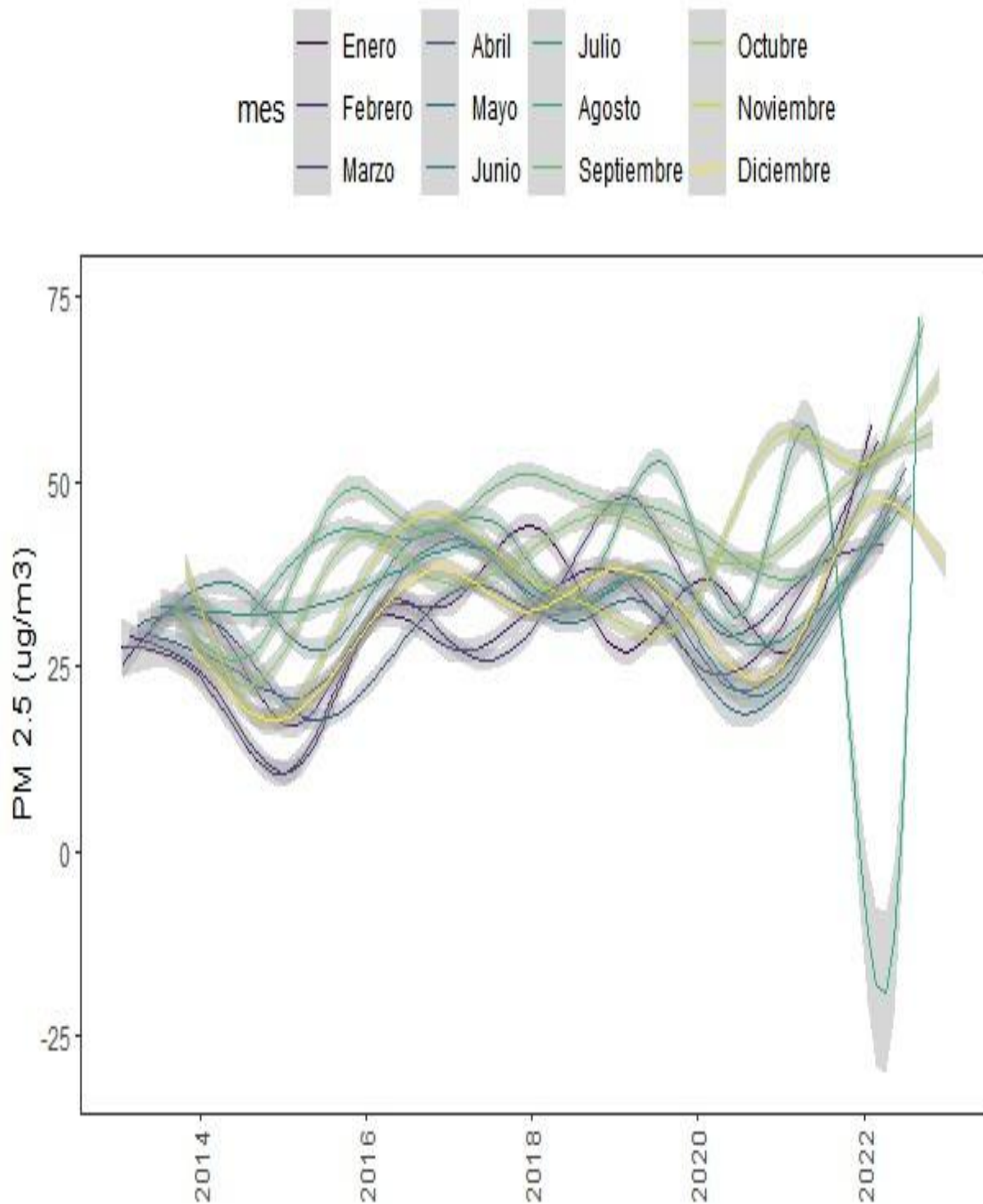


Figura 6: Análisis GAM de la temporalidad por meses de concentración
Fuente: Autor

4.2 Análisis mutitemporal de los datos combinados de concentración de PM_{2.5} de la EMOV EP e imágenes satelitales Landsat 8

Se obtuvieron 33 imágenes de 2013 a 2022 con una cobertura de nubes 60%. En los periodos analizados se realizaron diversas combinaciones de las bandas b1, b2, b3, b4, b5 y b6. Los mapas presentan un valor sobre dispersión del contaminante. De la misma manera se presenta el modelo de regresión utilizado para su respectiva obtención, en donde se alcanzó resultados significativos en gran parte de las fechas analizadas de F1 a F32. A excepción de la última fecha (F33), en la que tanto Poisson como Quasipoisson no arrojaron resultados significativos. Las concentraciones de PM_{2.5} en el periodo analizado (2013 a 2022) varían entre 1221.376 µm/m³ y -936.935 µm/m³, que varían en función del periodo de análisis.

Tabla 6. Rangos máximos y mínimos de dispersión de PM_{2.5} y distribuciones utilizadas para cada fecha en el periodo del 2013 al 2022

CÓDIGO	FECHA	RANGO	FAMILIA	DESCRIPCIÓN
F1	5/4/2013	Máy: 107.663 Mín: -40.425	Quasipoisson	Significativo
F2	8/8/2013	Máy: 7.517 Mín: -36.650	Poisson	Significativo
F3	11/28/2013	Máy: 288.547 Mín: -139.346	Quasipoisson	Significativo
F4	3/4/2014	Máy: 762.064 Mín: -580.445	Poisson	Significativo
F5	6/8/2014	Máy: 3.743 Mín: 1.055	Poisson	Significativo
F6	7/26/2014	Máy: 36.612 Mín: -41.478	Poisson	Significativo
F7	10/30/2014	Máy: 583.560 Mín: -77.377	Poisson	Significativo
F8	7/13/2015	Máy: 8.294 Mín: -81.243	Poisson	Significativo
F9	9/15/2015	Máy: 14.852 Mín: -7.568	Quasipoisson	Significativo
F10	11/2/2015	Máy: 132.543 Mín: -843.489	Quasipoisson	Significativo

Continuación de la Tabla 6. Rangos máximos y mínimos de dispersión de PM_{2.5} y distribuciones utilizadas para cada fecha en el periodo del 2013 al 2022

CÓDIGO	FECHA	RANGO	FAMILIA	DESCRIPCIÓN
F11	1/5/2016	Máy: 58.821 Mín: -181.407	Quasipoisson	Significativo
F12	11/20/2016	Máy: 195.502 Mín: -812.913	Quasipoisson	Significativo
F13	9/20/2017	Máy: 60.328 Mín: -28.446	Poisson	Significativo
F14	12/9/2017	Máy: 323.075 Mín: -78.992	Poisson	Significativo
F15	1/10/2018	Máy: 143.442 Mín: -259.960	Poisson	Significativo
F16	10/25/2018	Máy: 1221.376 Mín: -655.904	Quasipoisson	Significativo
F17	1/29/2019	Máy: 232.396 Mín: -265.712	Quasipoisson	Significativo
F18	8/25/2019	Máy: 90.426 Mín: -106.280	Poisson	Significativo
F19	12/15/2019	Máy: 289.496 Mín: -213.365	Poisson	Significativo
F20	4/21/2020	Máy: 657.575 Mín: -936.935	Poisson	Significativo
F21	6/24/2020	Máy: 3.698 Mín: -3.727	Poisson	Significativo
F22	8/11/2020	Máy: 14.987 Mín: -3.628	Poisson	Significativo
F23	8/27/2020	Máy: 55.116 Mín: -57.814	Quasipoisson	Significativo

Continuación de la Tabla 6. Rangos máximos y mínimos de dispersión de PM_{2.5} y distribuciones utilizadas para cada fecha en el periodo del 2013 al 2022

CÓDIGO	FECHA	RANGO	FAMILIA	DESCRIPCIÓN
F24	9/28/2020	Máx: 93.202 Mín: -14.140	Quasipoisson	Significativo
F25	3/23/2021	Máx: 8.326 Mín: -19.528	Quasipoisson	Significativo
F26	6/27/2021	Máx: 7.992 Mín: -3.459	Poisson	Significativo
F27	8/14/2021	Máx: 8.947 Mín: -1.514	Poisson	Significativo
F28	3/10/2022	Máx: 41.559 Mín: -161.364	Poisson	Significativo
F29	8/17/2022	Máx: 32.821 Mín: -222.507	Quasipoisson	Significativo
F30	9/2/2022	Máx: 32.491 Mín: -1.746	Poisson	Significativo
F31	9/18/2022	Máx: 159.763 Mín: -18.037	Poisson	Significativo
F32	11/5/2022	Máx: 53.340 Mín: -18.161	Poisson	Significativo
F33	11/21/2022	Máx: 2.724 Mín: 2.008	Quasipoisson	No significativo

Fuente: Autor

4.2.1 Análisis multitemporal del contaminante del periodo 2013

Para el año 2013 se obtuvo tres imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de $PM_{2.5}$ de la EMOV EP de las mismas fechas. La primera imagen del 2013 (F1: 04 de mayo de 2013) muestra que la combinación de las bandas b1, b2 y b3, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda (b1) no presentó significancia estadística. La banda 2 (b2) tuvo una relación positiva, mientras que la banda 3 (b3) negativa (Tabla 7).

Tabla 7. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 04/05/2013.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.09E+00	4.52E-02	46.216	<0.001
b1	-3.59E-05	2.34E-05	-1.538	0.124
b2	5.70E-05	2.85E-05	2.001	0.045
b3	-1.97E-05	9.15E-06	-2.15	0.032

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de $PM_{2.5}$ representados en color verde ($80.01 \mu\text{m}^3$ a $120 \mu\text{m}^3$, Figura 7). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, la parroquia Monay). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permitido por el TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$), ALARMA ($250 \mu\text{g}/\text{m}^3$), EMERGENCIA ($350 \mu\text{g}/\text{m}^3$), en la Tabla 3.

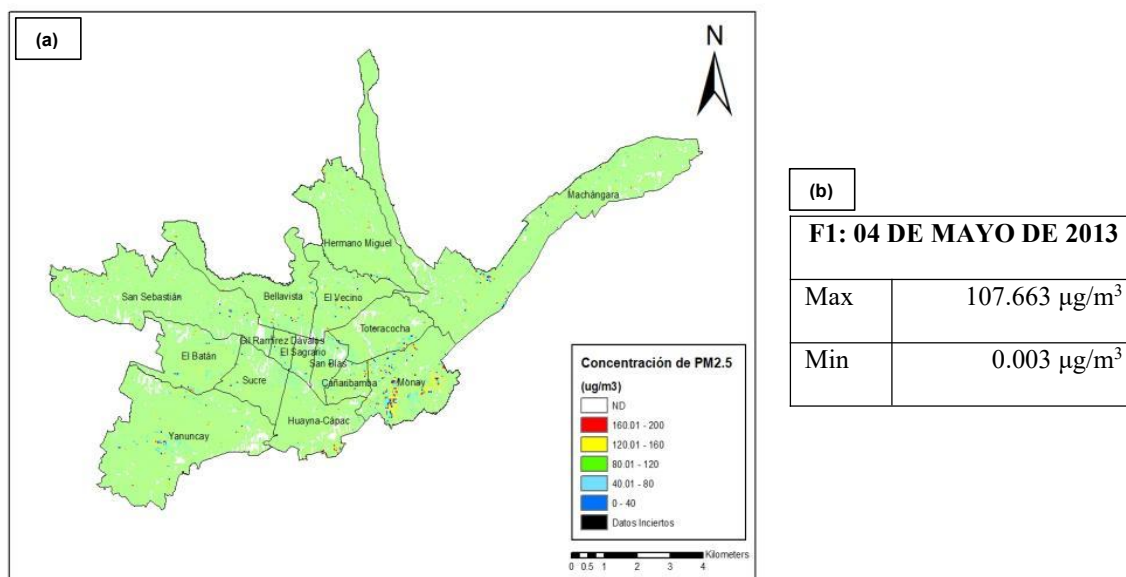


Figura 7: Concentración del Material Particulado en el año 04/05/2013, (a) Mapa de concentración de $PM_{2.5}$ que están entre los rangos $80.01 - 120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de $PM_{2.5}$ de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

Se contempla los resultados que se obtuvo de las imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La segunda imagen del 2013 (F2: 08 de agosto de 2013) muestra la combinación de las bandas b1, b2 y b6, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda (b6) no presento significancia estadística. La banda 1 (b1) tuvo una relación positiva, mientras que la banda 2 (b2) negativa (Tabla 8).

Tabla 8. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 08/08/2013.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.135E+00	2.13E-02	100.049	<0.001
b1	1.035E-05	5.121E-06	2.021	0.043
b2	-1.119E-05	5.703E-06	-1.961	0.049
b6	9.111E-07	6.701E-07	1.360	0.173

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 µg/m³ a 120 µg/m³, Figura 8). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, las parroquias Yanuncay y Bellavista). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permisible del TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA (150 µg/m³), ALARMA (250 µg/m³), EMERGENCIA (350 µg/m³).

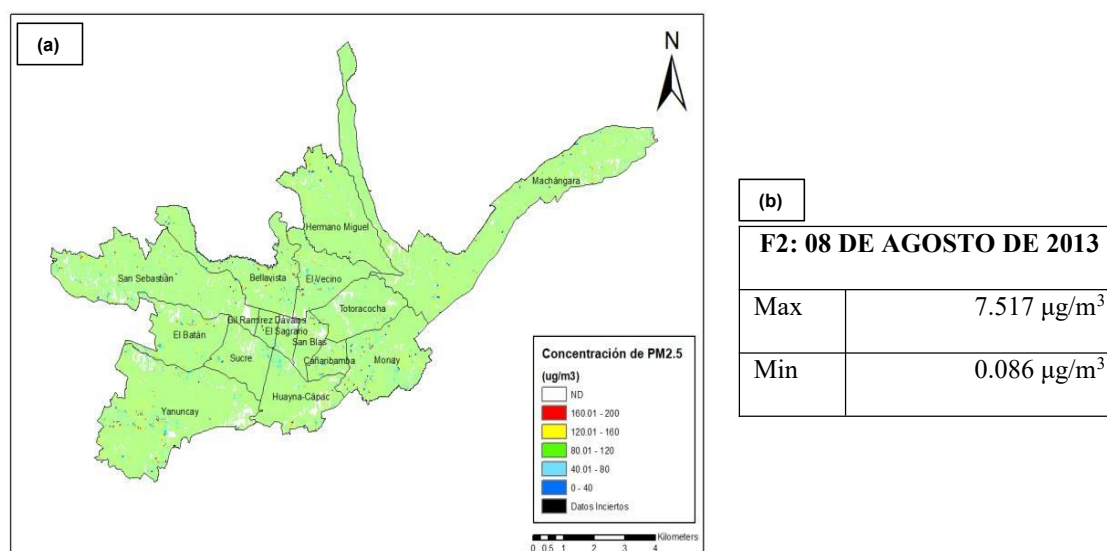


Figura 8: Concentración del Material Particulado en el año 08/08/2013, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 µg/m³, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

Se contempla los resultados que se obtuvo de las imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La tercera imagen del 2013 (F3: 28 de noviembre de 2013) muestra la combinación de las bandas b1, b2, b3, b4 y b5 es la mejor que funcionan. A pesar de que las bandas b1, b2 y b4 no presento significancia estadística, la banda 3 (b3) tuvo una relación positiva, mientras que la banda 5 (b5) negativa (Tabla 9).

Tabla 9. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 28/11/2013.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.35E+00	5.34E-02	44.013	<0.001
b1	-7.46E-05	6.57E-05	-1.136	0.256
b2	5.77E-05	5.84E-05	0.988	0.323
b3	7.25E-05	3.64E-05	1.992	0.046
b4	-4.28E-05	2.76E-05	-1.553	0.121
b5	-1.11E-05	5.14E-06	-2.151	0.031

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 µg/m³ a 120 µg/m³, Figura 9). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, las parroquias San Sebastián, El Vecino, Hermano Miguel y Yanuncay). No obstante, estos valores sobrepasan el límite máximo permitido por el TULSMA, por encima de los rangos de ALERTA (150 µg/m³), ALARMA (250 µg/m³), EMERGENCIA (350 µg/m³).

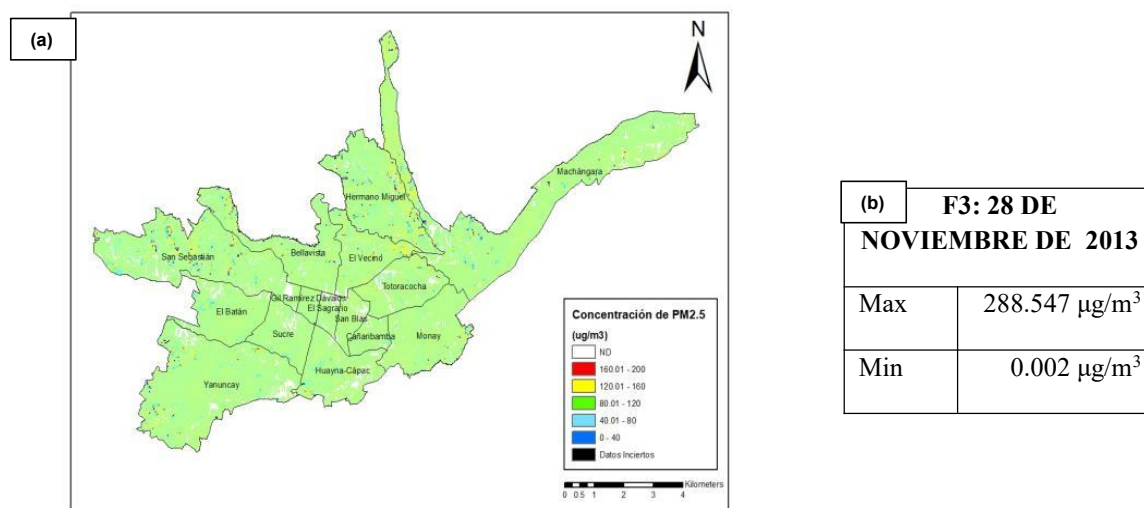


Figura 9: Concentración del Material Particulado en el año 28/11/2013, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que sobrepaso los rangos 250.01 - 350 µg/m³, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

4.2.2 Análisis multitemporal del contaminante del periodo 2014

Para el año 2014 se obtuvo cuatro imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La primera imagen del 2014 (F4: 04 de marzo de 2014) muestra la combinación de las bandas b1, b5 y b6, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda b1 y b5 (b1, b5) tuvo una relación positiva, mientras que la banda 6 (b6) negativa (Tabla 10).

Tabla 10. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 04/03/2014.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	1.70E+00	2.06E-02	82.549	<0.001
b1	2.31E-05	5.45E-06	4.242	0.0002
b5	2.96E-06	1.51E-06	1.966	0.0004
b6	-1.71E-05	4.08E-06	-4.183	0.0002

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 µm/m³ a 120 µm/m³, Figura 10). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, la parroquia Yanuncay). No obstante, estos valores sobrepasan el límite máximo permitido por el TULSMA, por encima de los rangos de ALERTA (150 µg/m³), ALARMA (250 µg/m³), EMERGENCIA (350 µg/m³).

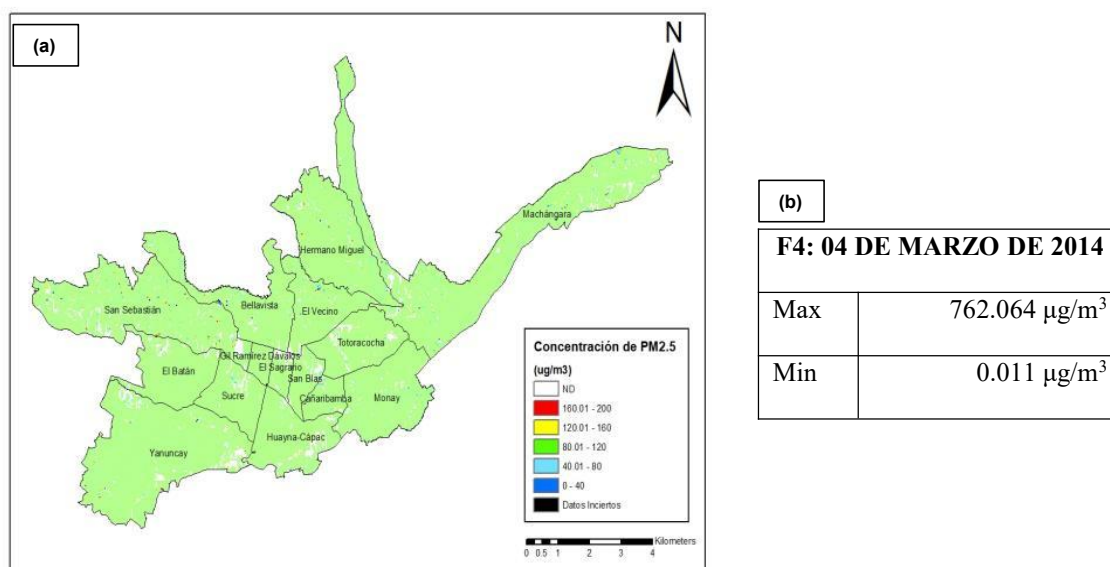


Figura 10: Concentración del Material Particulado en el año 04/03/2014, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que sobrepaso los rangos 350.01 - 850 µg/m³, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

Se contempla los resultados que se obtuvo de las imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La segunda imagen del 2014 (F5: 08 de agosto de 2014) muestra la combinación de las bandas b3 y b5, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda b5 (b5) tuvo una relación positiva, mientras que la banda 3 (b3) negativa (Tabla 11).

Tabla 11. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 08/06/2014.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.26E+00	1.27E-02	178.273	<0.001
b3	-1.16E-06	3.38E-07	-3.425	0.0006
b5	6.60E-07	2.09E-07	3.16	0.0015

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 µg/m³ a 120 µg/m³, Figura 11). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, las parroquias Yanuncay, El Batán, Sucre, Huayna Capac, Gil Ramírez Davalos, El Sagrario, San Blas, Monay y Totoracocha). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permitido por el TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA (150 µg/m³), ALARMA (250 µg/m³), EMERGENCIA (350 µg/m³).

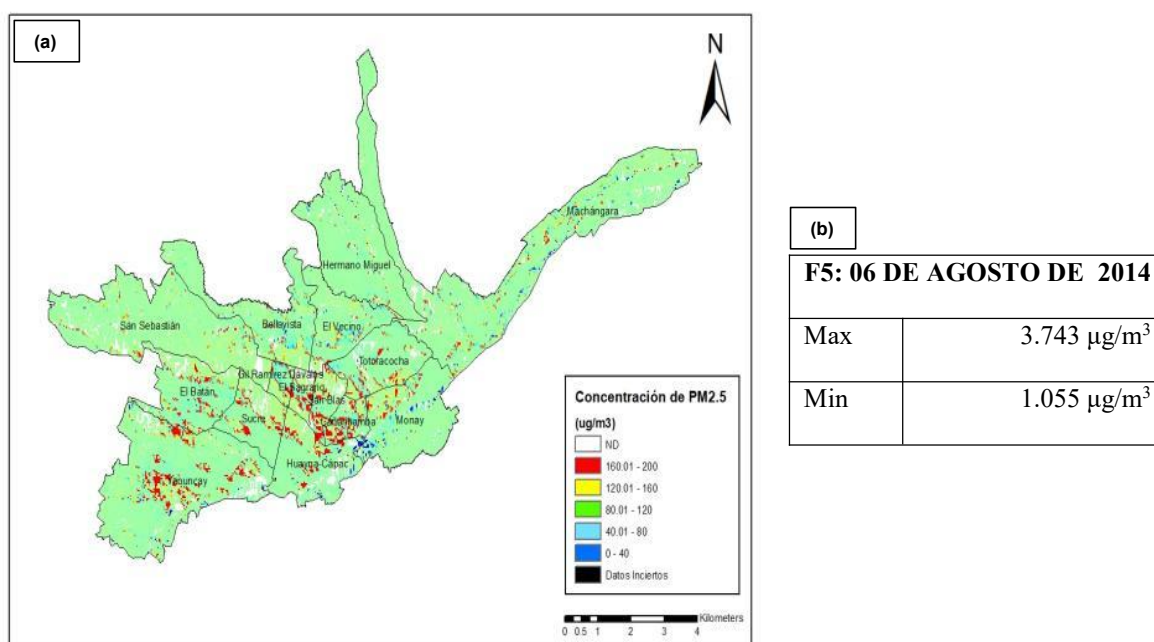


Figura 11: Concentración del Material Particulado en el año 06/08/2014, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 µg/m³, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

Se contempla los resultados que se obtuvo de las imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La tercera imagen del 2014 (F6: 26 de julio de 2014) muestra la combinación de las bandas b2 y b4, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda b4 (b4) tuvo una relación positiva, mientras que la banda 2 (b2) negativa (Tabla 12).

Tabla 12. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 26/07/2014.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.47E+00	3.35E-02	73.688	<0.001
b2	-3.25E-05	8.50E-06	-3.82	0.0001
b4	2.79E-05	7.26E-06	3.842	0.0001

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 µg/m³ a 120 µg/m³, Figura 12). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, las parroquias Cañaribamba, Monay, El Sagrario y Gil Ramírez Dávalos). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permisible del TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA (150 µg/m³), ALARMA (250 µg/m³), EMERGENCIA (350 µg/m³).

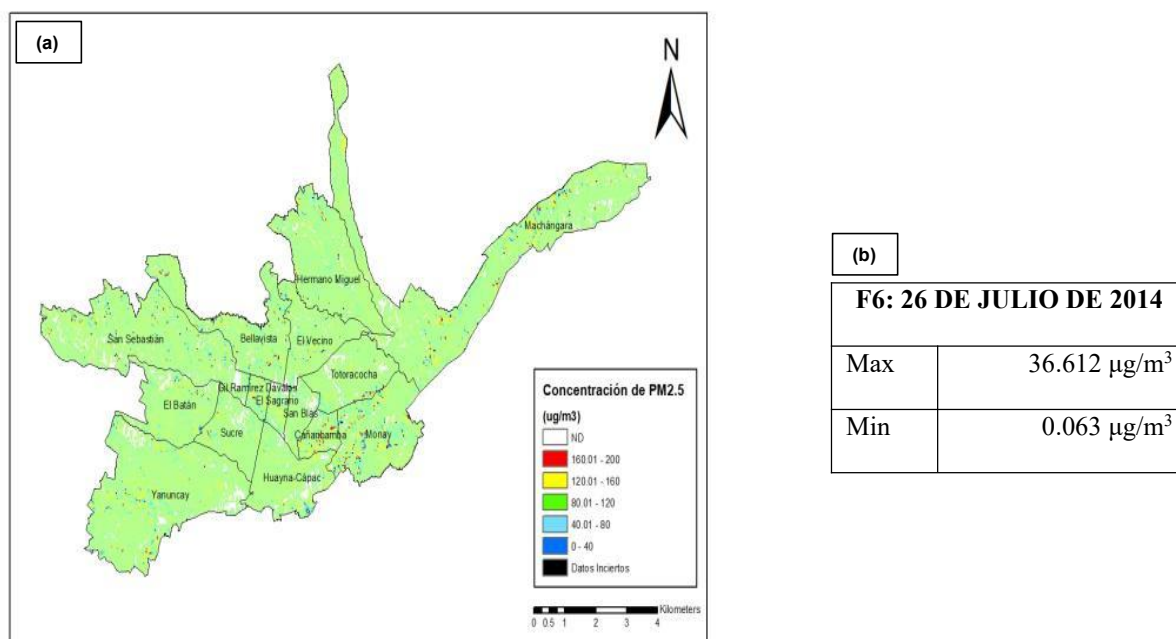


Figura 12: Concentración del Material Particulado en el año 26/07/2014, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 µg/m³, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

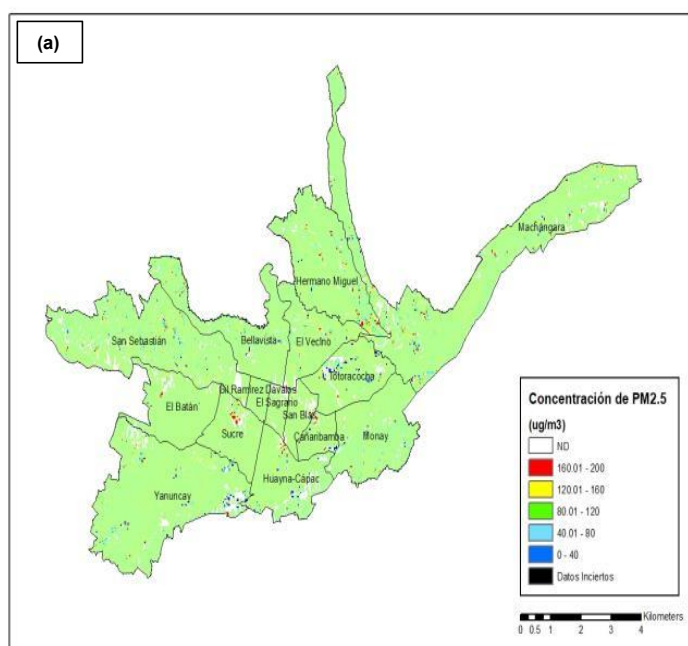
Se contempla los resultados que se obtuvo de las imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La cuarta imagen del 2014 (F7: 30 de octubre de 2014) muestra la combinación de las bandas b2 y b6, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda b2 (b2) tuvo una relación positiva, mientras que la banda 6 (b6) negativa (Tabla 13).

Tabla 13. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 30/10/2014.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	1.85E+00	3.07E-02	60.371	<0.001
b2	4.23E-05	5.27E-06	8.025	0.0001
b6	-2.57E-05	3.22E-06	-7.979	0.0001

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Figura 13). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, las parroquias Sucre, y Cañaribamba). No obstante, estos valores sobrepasan el límite máximo permitido por el TULSMA, por encima de los rangos de ALERTA (150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ALARMA (250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), EMERGENCIA (350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).



(b)	
F7: 30 DE OCTUBRE DE 2014	
Max	583.560 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Min	0.005 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Figura 13: Concentración del Material Particulado en el año 30/10/2014, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que sobrepasa los rangos 350.01 - 850 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

4.2.3 Análisis multitemporal del contaminante del periodo 2015

Para el año 2015 se obtuvo tres imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La primera imagen del 2015 (F8: 13 de julio de 2015) muestra la combinación de las bandas 1 y 2, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda 2 (b2) tuvo una relación positiva, mientras que la banda 1 (b1) negativa (Tabla 14).

Tabla 14. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 13/07/2015.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.15E+00	1.26E-02	170.9	<0.001
b1	-1.41E-05	4.32E-06	-3.266	0.0010
b2	1.39E-05	4.24E-06	3.267	0.0010

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 µg/m³ a 120 µg/m³, Figura 14). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, las parroquias El Batán, El Sagrario y Gil Ramírez Dávalos). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permisible del TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA (150 µg/m³), ALARMA (250 µg/m³), EMERGENCIA (350 µg/m³).

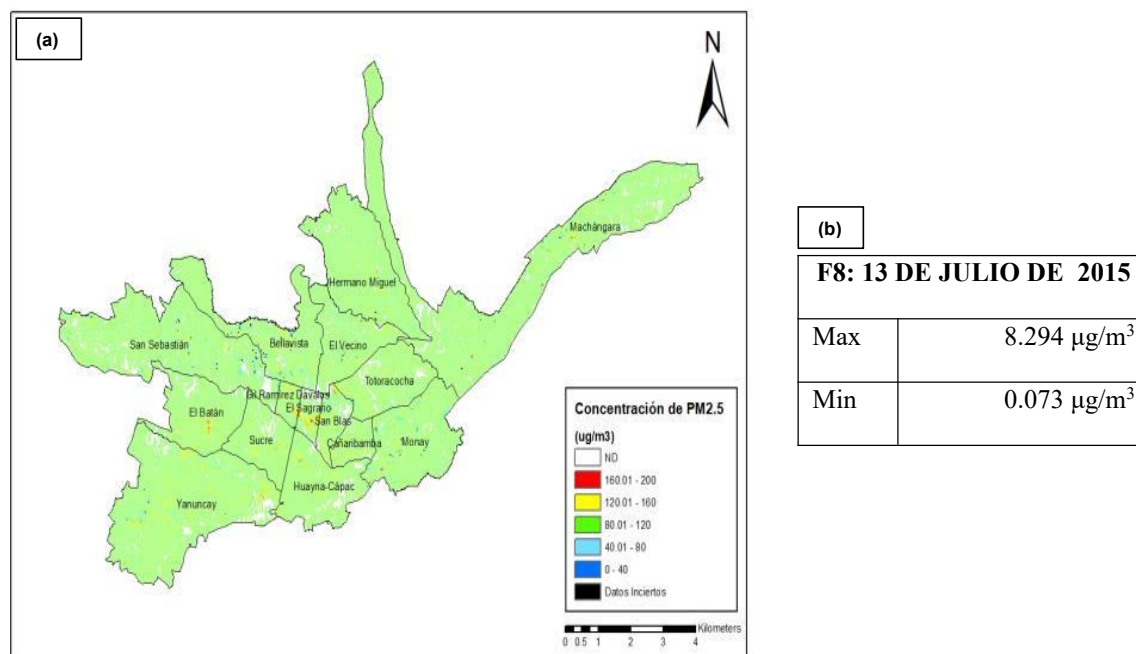


Figura 14: Concentración del Material Particulado en el año 13/07/2015, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 µg/m³, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

Se contempla los resultados que se obtuvo de las imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La segunda imagen del 2015 (F9: 15 de septiembre de 2015) muestra la combinación de las bandas b1, b2, b4 y b5, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda b1, b4 y b5 (b1, b4 y b5) tuvo una relación positiva, mientras que la banda 2 (b2) negativa (Tabla 15).

Tabla 15. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 15/09/2015.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.61E+00	2.26E-02	115.48	<0.001
b1	1.16E-05	4.81E-06	2.418	0.0158
b2	-1.71E-05	6.10E-06	-2.799	0.0052
b4	3.95E-06	1.30E-06	3.051	0.0023
b5	6.12E-07	2.67E-07	2.292	0.0221

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 µg/m³ a 120 µg/m³, Figura 15). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, las parroquias El Batán y Sucre). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permitido por el TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA (150 µg/m³), ALARMA (250 µg/m³), EMERGENCIA (350 µg/m³).

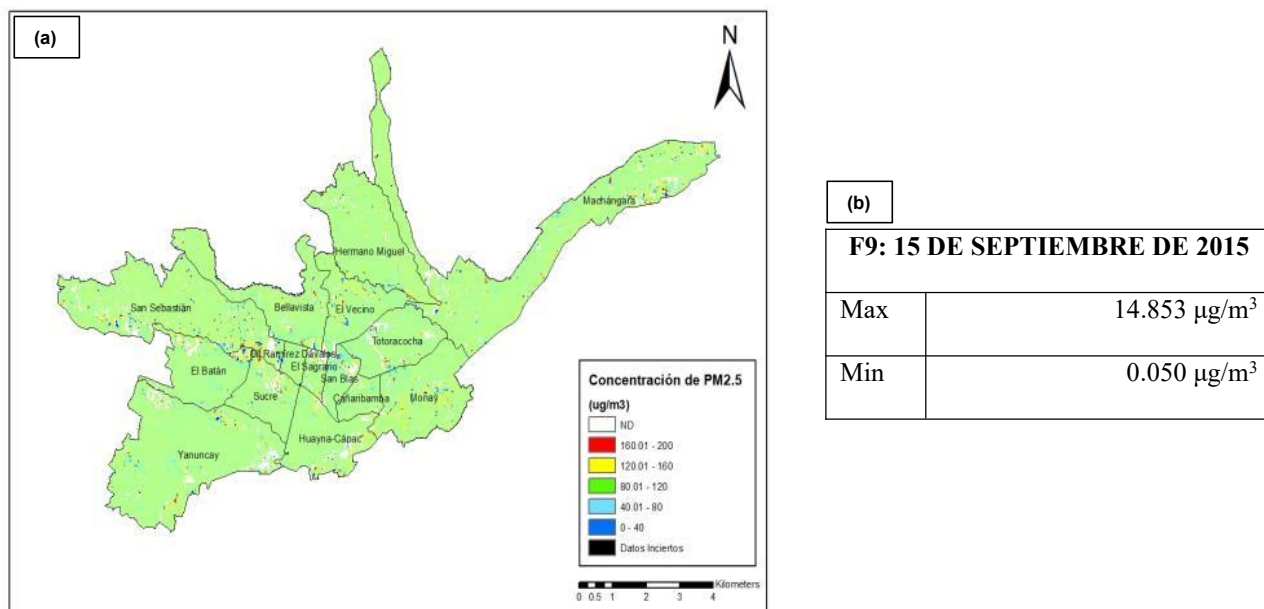


Figura 15: Concentración del Material Particulado en el año 15/09/2015, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 µg/m³, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

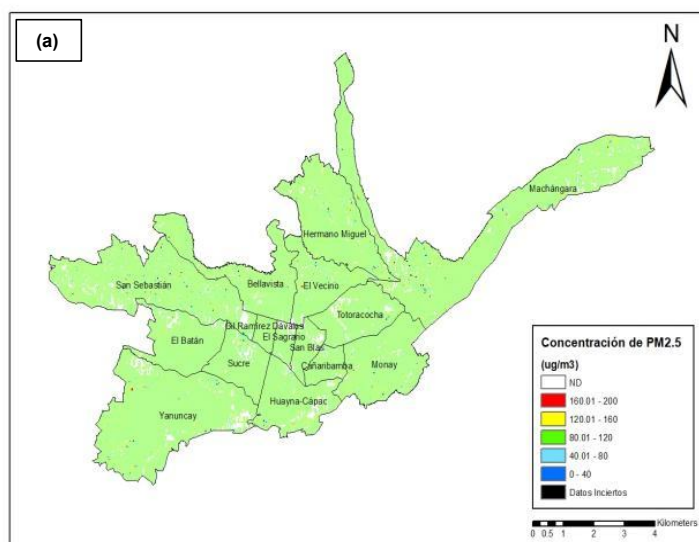
Se contempla los resultados que se obtuvo de las imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La tercera imagen del 2015 (F10: 02 de noviembre de 2015) muestra la combinación de las bandas b2, b3, b4, b5 y b6, es la mejor que funciona. A pesar de que la b2, b3, b5, b6 no presento significancia estadística. La banda 4 (b4) tuvo una relación negativa (Tabla 16).

Tabla 16. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 02/11/2015.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.24E+00	6.26E-02	35.796	<0.001
b2	3.18E-05	5.22E-05	0.609	0.542
b3	2.45E-05	4.39E-05	0.558	0.577
b4	-5.58E-05	2.54E-05	-2.202	0.028
b5	-5.45E-06	5.13E-06	-1.062	0.289
b6	9.13E-06	1.38E-05	0.664	0.507

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 µg/m³ a 120 µg/m³, Figura 16). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, la parroquia Yanuncay). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permisible del TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA (150 µg/m³), ALARMA (250 µg/m³), EMERGENCIA (350 µg/m³).



F10: 02 DE NOVIEMBRE DE 2015	
Max	132.543 µg/m ³
Min	0.007 µg/m ³

Figura 16: Concentración del Material Particulado en el año 02/11/2015, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 80.01 - 120 µg/m³, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

4.2.4 Análisis multitemporal del contaminante del periodo 2016

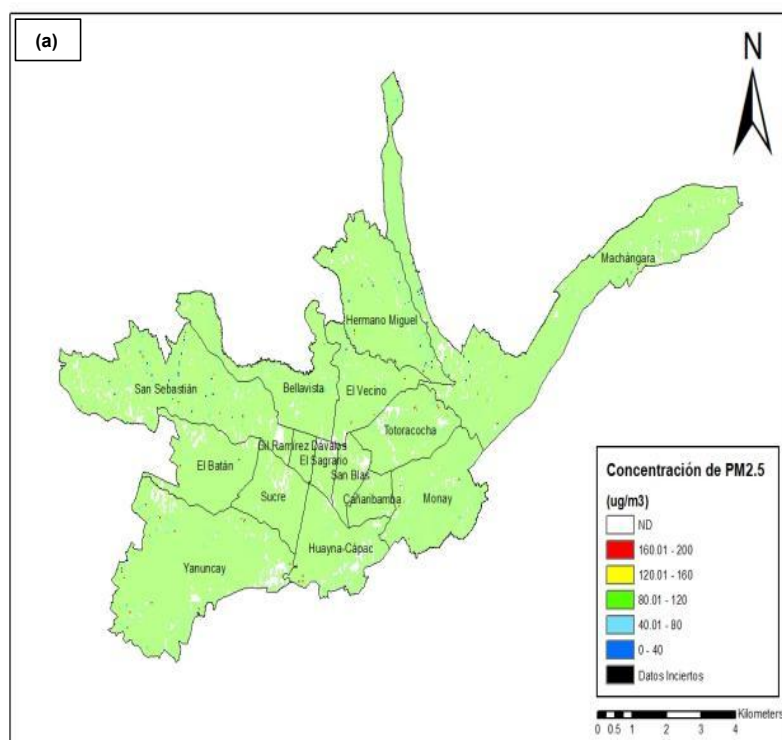
Para el año 2016 se obtuvo dos imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de $PM_{2.5}$ de la EMOV EP de las mismas fechas. La primera imagen del 2016 (F11: 05 de enero de 2016) muestra la combinación de las bandas 4, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda 4 (b4) tuvo una relación positiva (Tabla 17).

Tabla 17. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 05/01/2016.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.06E+00	3.99E-02	51.626	<0.001
b4	1.56E-06	7.13E-07	2.187	0.029

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de $PM_{2.5}$ representados en color verde ($80.01 \mu\text{m}^3$ a $120 \mu\text{m}^3$, Figura 17). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, la parroquia Yanuncay). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permitido por el TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$), ALARMA ($250 \mu\text{g}/\text{m}^3$), EMERGENCIA ($350 \mu\text{g}/\text{m}^3$).



F11: 05 DE ENERO DE 2016	
Max	58.821 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Min	0.038 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Figura 17: Concentración del Material Particulado en el año 05/01/2016, (a) Mapa de concentración de $PM_{2.5}$ que están entre los rangos $40.01 - 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de $PM_{2.5}$ de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

Se observa los resultados que se obtuvo de las imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La segunda imagen del 2016 (F12: 20 de noviembre de 2016) muestra la combinación de las bandas b1, b3 y b6, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda b3 (b3) tuvo una relación positiva, mientras que la banda b1 y b6 (b1, b6) negativa (Tabla 18).

Tabla 18. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 20/11/2016.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.60E+00	3.25E-02	79.96	<0.001
b1	-8.51E-05	3.04E-05	-2.797	0.005
b3	8.74E-05	3.32E-05	2.63	0.008
b6	-1.16E-05	5.65E-06	-2.055	0.040

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 μm^3 a 120 μm^3 , Figura 18). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, las parroquias San Sebastián y Hermano Miguel). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permisible del TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA (150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ALARMA (250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), EMERGENCIA (350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

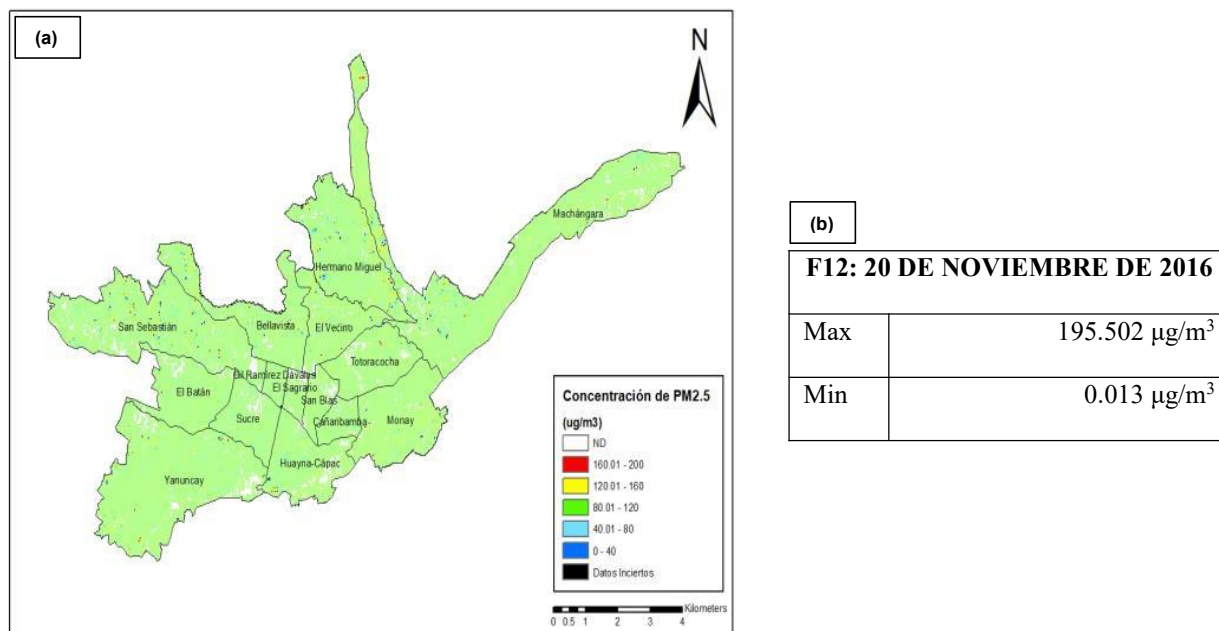


Figura 18: Concentración del Material Particulado en el año 20/11/2016, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 160.01 - 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

4.2.5 Análisis multitemporal del contaminante del periodo 2017

Para el año 2017 se obtuvo dos imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La primera imagen del 2017 (F13: 20 de septiembre de 2017) muestra la combinación de las bandas b3, b4, b5 y b6, es la mejor que funciona. A pesar de que las bandas b4, b5 y b6 (b4, b5, b6) tuvo una relación positiva, mientras que la banda 3 (b3) negativa (Tabla 19).

Tabla 19. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 20/09/2017.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.71E+00	9.86E-03	274.897	<0.001
b3	-1.05E-05	4.28E-06	-2.46	0.0139
b4	1.28E-05	4.30E-06	2.983	0.002
b5	1.47E-06	7.13E-07	2.059	0.039
b6	8.03E-07	8.03E-07	-4.605	0.039

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Figura 19). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, las parroquias Sucre, Huayna Cápac, El Sagrario y Totoracocha). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permitido por el TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA (150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ALARMA (250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), EMERGENCIA (350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

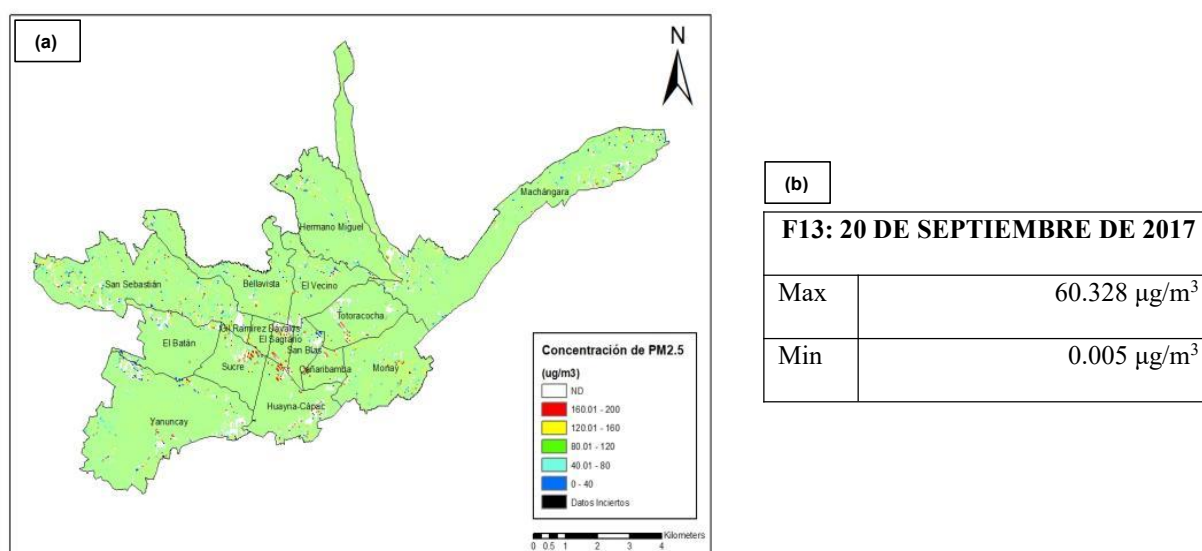


Figura 19: Concentración del Material Particulado en el año 20/09/2017, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 40.01 - 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

Se contempla los resultados que se obtuvo de las imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La segunda imagen del 2017 (F14: 09 de diciembre de 2017) muestra la combinación de las bandas b4 y b6, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda b4 (b4) tuvo una relación positiva, mientras que la banda 6 (b6) negativa (Tabla 20).

Tabla 20. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 09/12/2017.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.14E+00	1.45E-02	148.173	<0.001
b4	1.02E-05	4.64E-06	2.192	0.028
b6	-7.96E-06	3.36E-06	-2.37	0.178

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 µm/m³ a 120 µm/m³, Figura 20). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, las parroquias San Sebastián y Machángara). No obstante, estos valores sobrepasan el límite máximo permitido por el TULSMA, por encima de los rangos de ALERTA (150 µg/m³), ALARMA (250 µg/m³), EMERGENCIA (350 µg/m³).

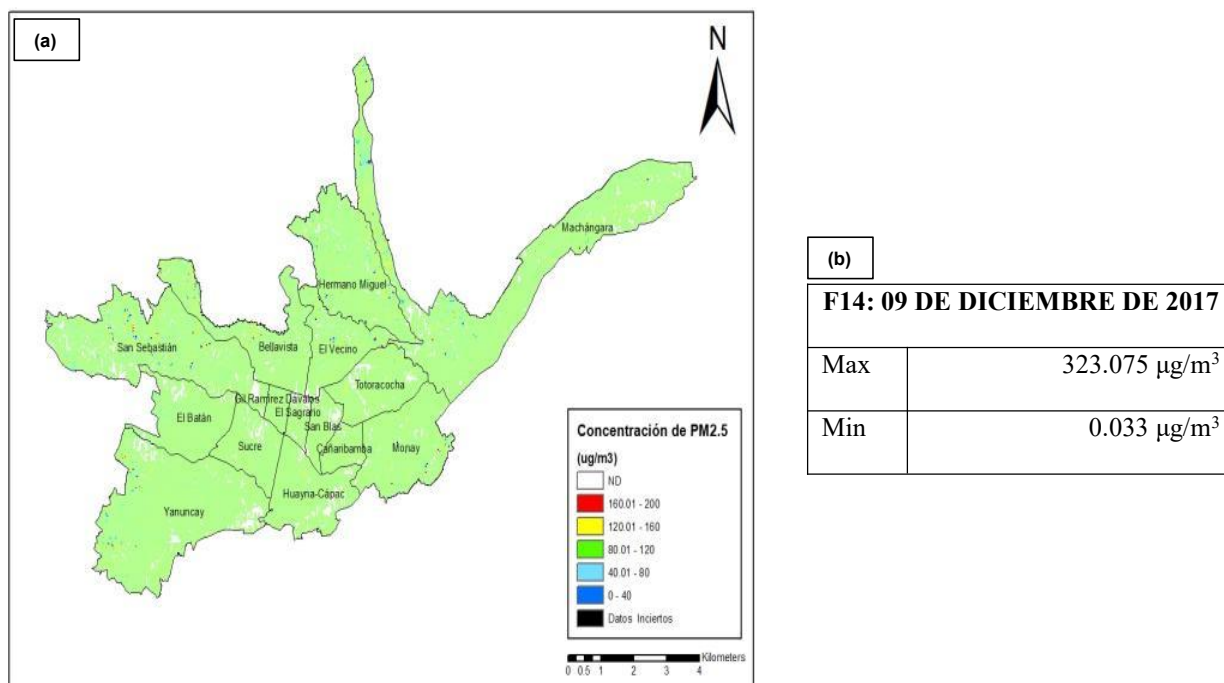


Figura 20: Concentración del Material Particulado en el año 09/12/2017, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que sobrepaso los rangos 250.01 - 350 µg/m³, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

4.2.6 Análisis multitemporal del contaminante del periodo 2018

Para el año 2018 se obtuvo dos imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La primera imagen del 2018 (F15: 10 de enero de 2018) muestra la combinación de las bandas 1, 2, 4 y 6, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda b6 no presentó significancia estadística. La banda b1 y b4 (b1, b4) tuvo una relación positiva, mientras que la banda 2 (b2) negativa (Tabla 21).

Tabla 21. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 10/01/2018.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.50E+00	1.23E-02	203.527	<0.001
b1	3.91E-05	1.92E-05	2.037	0.041
b2	-7.17E-05	2.50E-05	-2.874	0.004
b4	3.01E-05	9.43E-06	3.196	0.001
b6	-6.09E-07	6.25E-07	-0.974	0.330

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 µg/m³ a 120 µg/m³, Figura 21). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, la parroquia Machángara). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permitido por el TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA (150 µg/m³), ALARMA (250 µg/m³), EMERGENCIA (350 µg/m³).

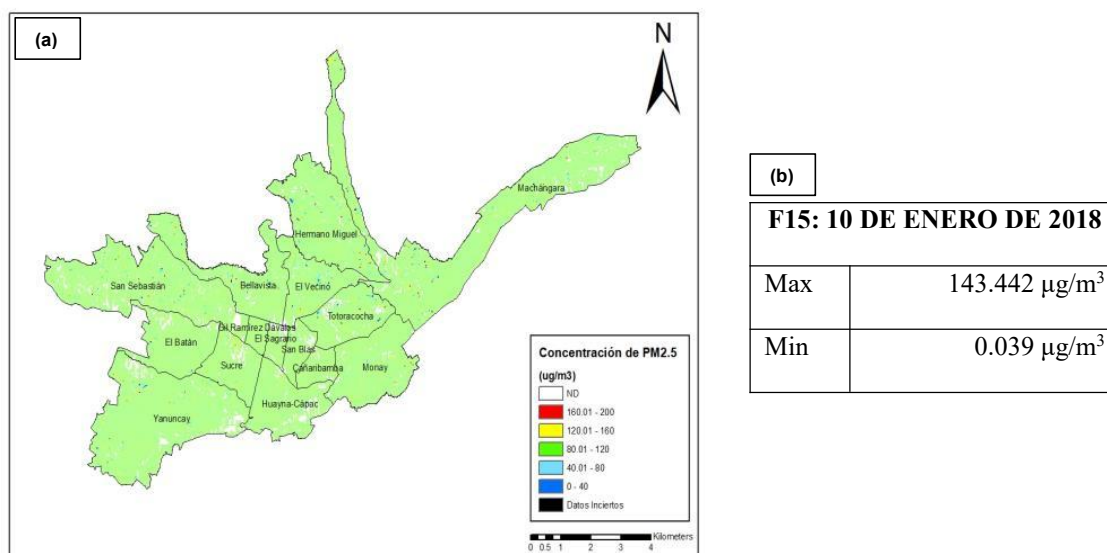


Figura 21: Concentración del Material Particulado en el año 10/01/2018, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 120.01 - 160 µg/m³, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

Se contempla los resultados que se obtuvo de las imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La segunda imagen del 2018 (F16: 25 de octubre de 2018) muestra la combinación de las bandas b4, b5 y b6, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda b6 (b6) tuvo una relación positiva, mientras que la banda b4 y b5 (b4, b5) negativa (Tabla 22).

Tabla 22. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 25/10/2018.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.50E+00	2.94E-02	85.271	<0.001
b4	-2.25E-05	1.05E-05	-2.14	0.032
b5	-1.11E-05	3.74E-06	-2.963	0.003
b6	2.86E-05	1.03E-05	2.776	0.005

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 μm^3 a 120 μm^3 , Figura 22). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, la parroquia Hermano Miguel). No obstante, estos valores sobrepasan el límite máximo permitido por el TULSMA, por encima de los rangos de ALERTA (150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ALARMA (250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), EMERGENCIA (350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

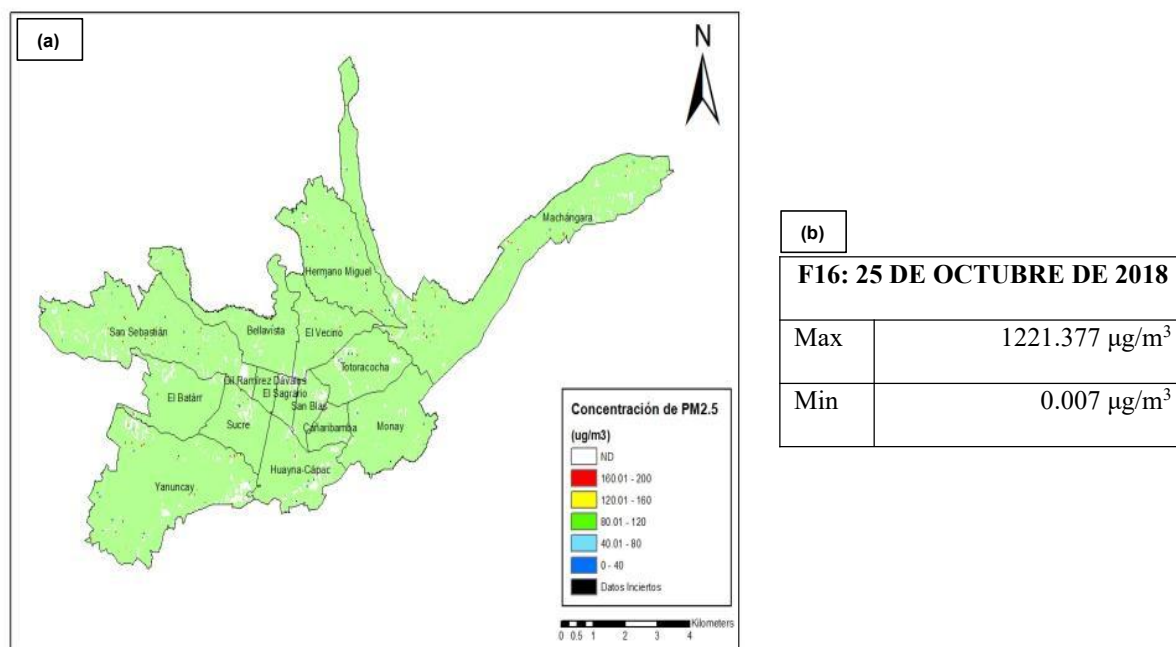


Figura 22: Concentración del Material Particulado en el año 25/10/2018, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que sobrepaso los rangos 350.01 - 1250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

4.2.7 Análisis multitemporal del contaminante del periodo 2019

Para el año 2019 se obtuvo tres imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La primera imagen del 2019 (F17: 29 de enero de 2019) muestra la combinación de las bandas b1, b2, b3, b4 y b5, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda b1, b2 y b4 (b1, b2, b4) no presento significancia estadística. La banda b5 (b5) tuvo una relación positiva, mientras que la banda 3 (b3) negativa (Tabla 23).

Tabla 23. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 29/01/2019.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	1.94E+00	1.05E-01	18.569	<0.001
b1	-1.50E-04	1.39E-04	-1.077	0.281
b2	2.69E-04	1.79E-04	1.506	0.132
b3	-2.46E-04	1.12E-04	-2.184	0.029
b4	8.97E-05	5.61E-05	1.6	0.110
b5	2.65E-05	1.23E-05	2.145	0.032

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde ($80.01 \mu\text{m}^3$ a $120 \mu\text{m}^3$, Figura 23). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, las parroquias Machángara y Yanuncay). No obstante, estos valores sobrepasan el límite máximo permitido por el TULSMA, por encima de los rangos de ALERTA ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$), ALARMA ($250 \mu\text{g}/\text{m}^3$), EMERGENCIA ($350 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

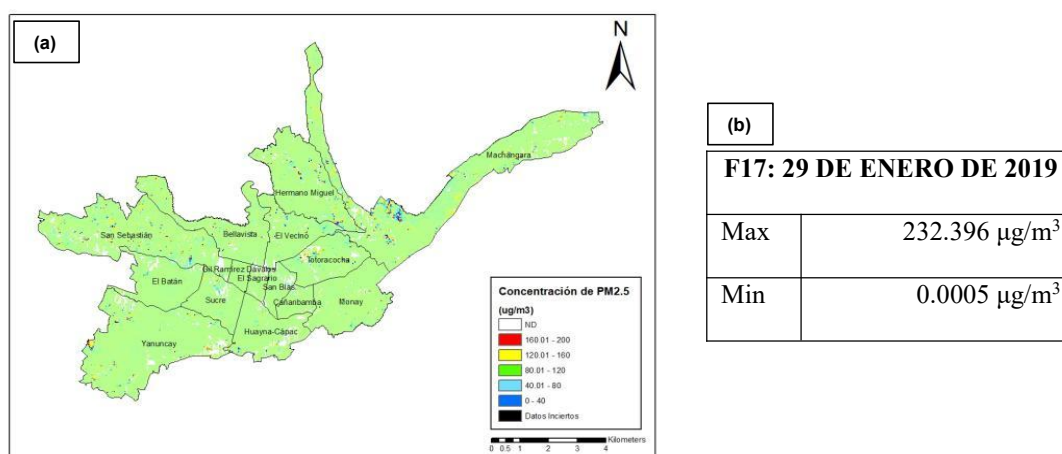


Figura 23: Concentración del Material Particulado en el año 29/01/2019, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que sobrepaso los rangos 200.01 - 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

Se contempla los resultados que se obtuvo de las imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La segunda imagen del 2019 (F18: 25 de agosto de 2019) muestra la combinación de las bandas b1, b2 y b6, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda b1 y b6 (b1, b6) tuvo una relación positiva, mientras que la banda 2 (b2) negativa (Tabla 24).

Tabla 24. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 25/08/2019.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.68E+00	1.01E-02	265.892	<0.001
b1	5.52E-06	2.02E-06	2.725	0.006
b2	-6.09E-06	2.20E-06	-2.771	0.005
b6	5.21E-07	1.92E-07	2.715	0.006

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 μm^3 a 120 μm^3 , Figura 24). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, las parroquias Yanuncay, El Batán, Huayna Cápac, San Blas y El Sagrario). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permisible del TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA (150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ALARMA (250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), EMERGENCIA (350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

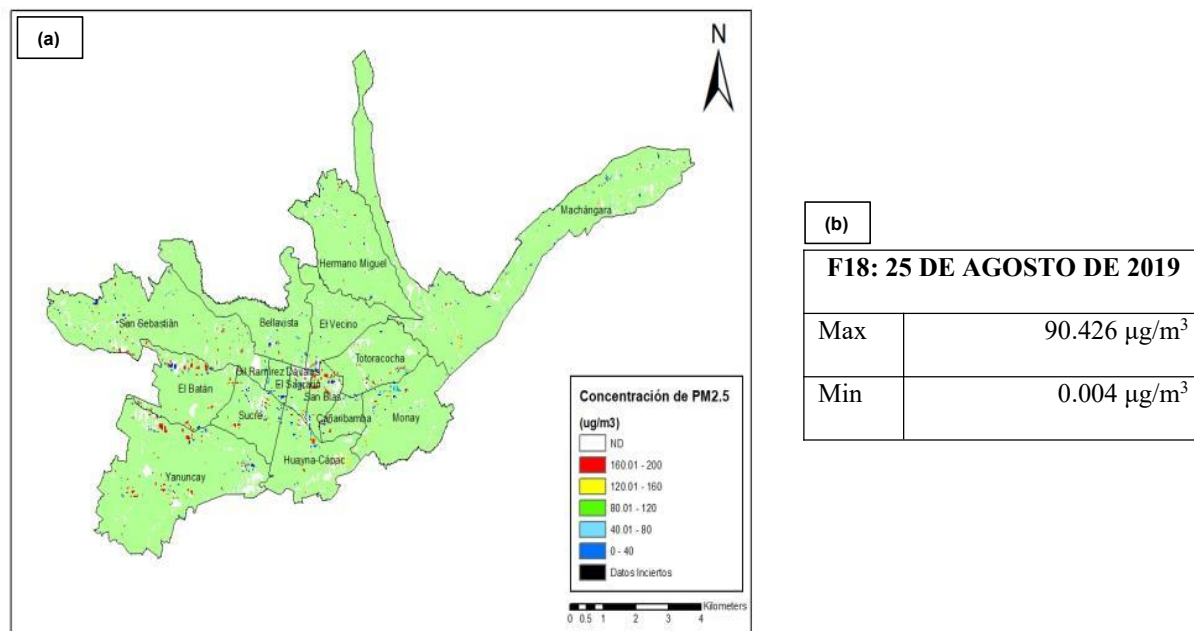


Figura 24: Concentración del Material Particulado en el año 25/08/2019, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 80.01 - 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

Se contempla los resultados que se obtuvo de las imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La tercera imagen del 2019 (F19: 15 de diciembre de 2019) muestra la combinación de las bandas b1, b4, b5 y b6, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda b1, b5 y b6 (b1, b5, b6) tuvo una relación positiva, mientras que la banda 4 (b4) negativa (Tabla 25).

Tabla 25. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 15/12/2019.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.25E+00	2.01E-02	111.95	<0.001
b1	3.95E-05	8.90E-06	4.435	0.00009
b4	-5.84E-05	1.24E-05	-4.723	0.0002
b5	1.05E-05	2.01E-06	5.238	0.00001
b6	7.18E-06	2.76E-06	2.599	0.009

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 µg/m³ a 120 µg/m³, Figura 25). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, las parroquias Machángara y Hermano Miguel). No obstante, estos valores sobrepasan el límite máximo permitido por el TULSMA, por encima de los rangos de ALERTA (150 µg/m³), ALARMA (250 µg/m³), EMERGENCIA (350 µg/m³).

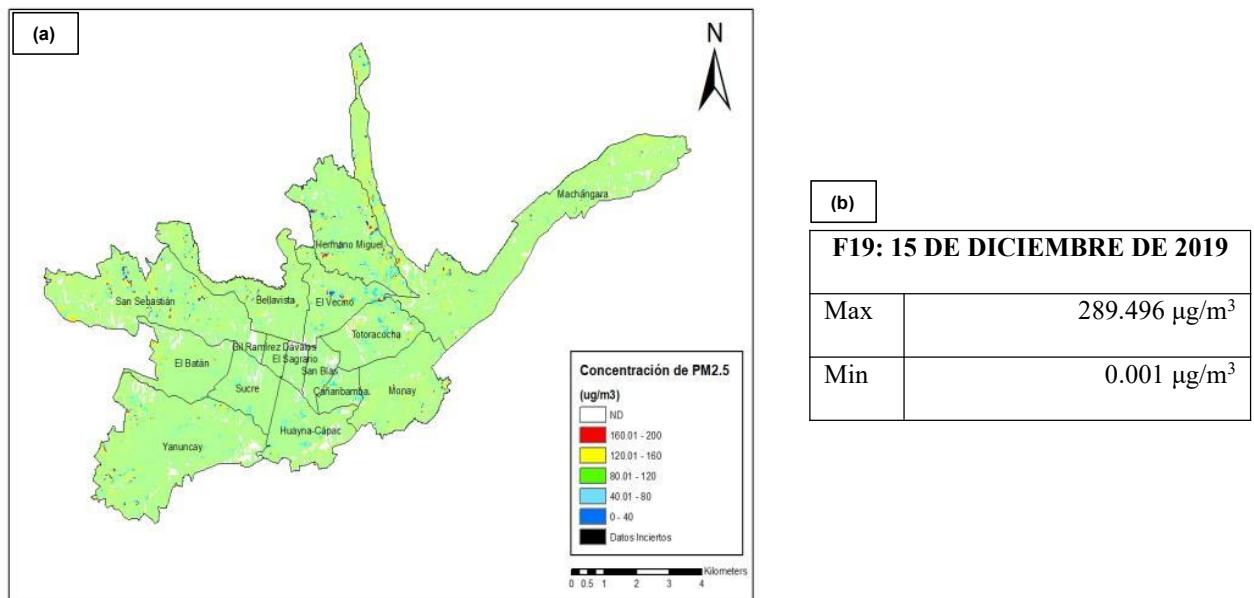


Figura 25: Concentración del Material Particulado en el año 15/12/2019, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que sobrepaso los rangos 200.01 - 300 µg/m³, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

4.2.8 Análisis multitemporal del contaminante del periodo 2020

Para el año 2020 se obtuvo cinco imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La primera imagen del 2020 (F20: 21 de abril de 2020) muestra la combinación de las bandas b1, b2 y b6, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda b1 y b6 (b1, b6) tuvo una relación positiva, mientras que la banda 2 (b2) negativa (Tabla 26).

Tabla 26. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 21/04/2020.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	1.73E+00	1.73E-02	99.598	<0.001
b1	1.22E-05	3.61E-06	3.373	0.0007
b2	-1.62E-02	4.85E-06	-3.343	0.0008
b6	2.84E-06	1.31E-06	2.174	0.029

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 μm^3 a 120 μm^3 , Figura 26). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, la parroquia Monay). No obstante, estos valores sobrepasan el límite máximo permitido por el TULSMA, por encima de los rangos de ALERTA (150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ALARMA (250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), EMERGENCIA (350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

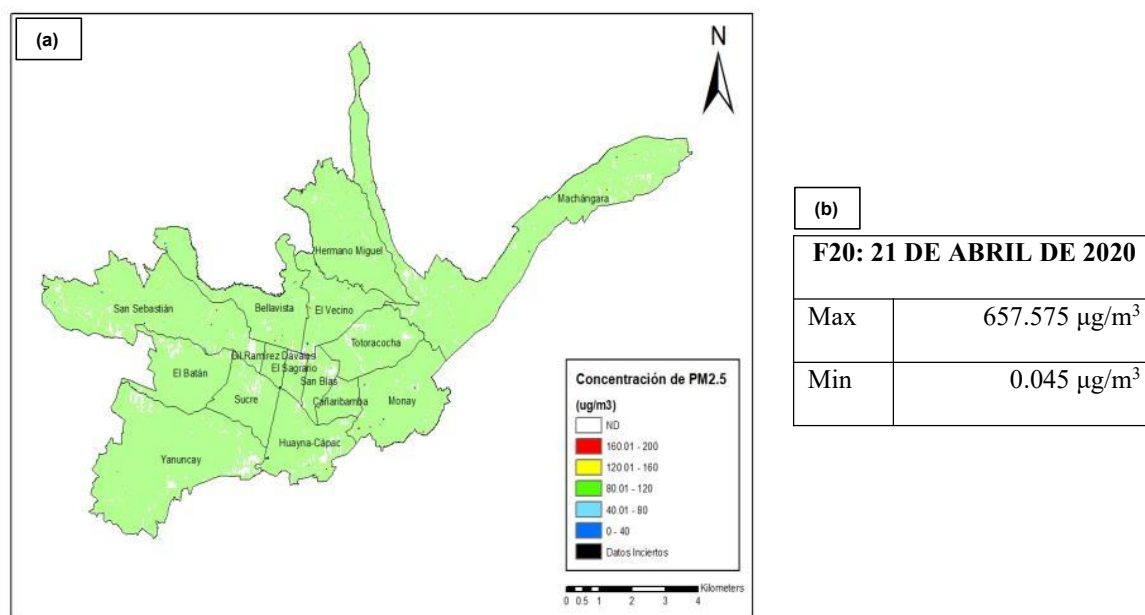


Figura 26: Concentración del Material Particulado en el año 21/04/2020, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que sobrepaso los rangos 350.01 - 700 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

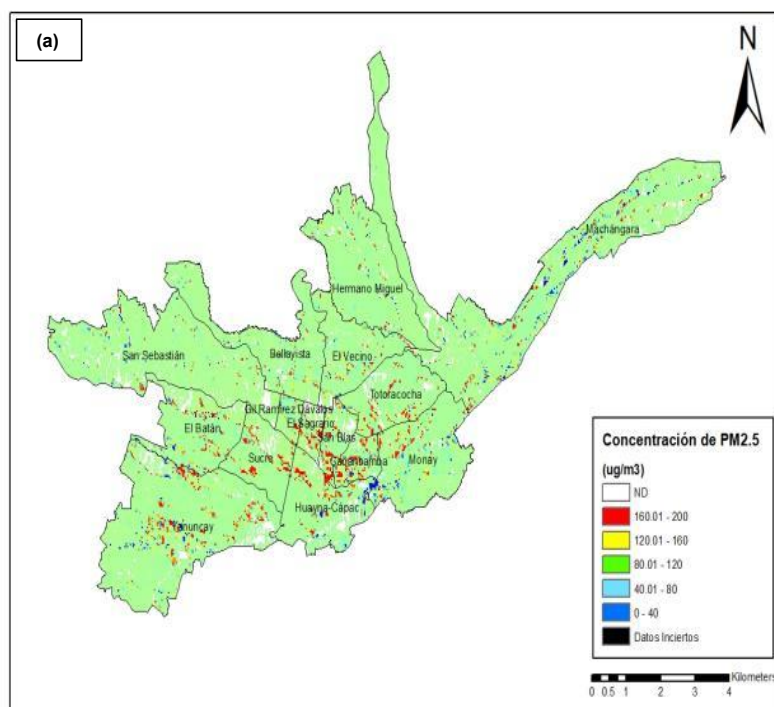
Se contempla los resultados que se obtuvo de las imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La segunda imagen del 2020 (F21: 24 de junio de 2020) muestra la combinación de las bandas b1 y b6, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda b1 (b1) tuvo una relación positiva, mientras que la banda 6 (b6) negativa (Tabla 27).

Tabla 27. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 24/06/2020.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	1.65E+00	1.98E-02	82.947	<0.001
b1	-2.30E-06	1.00E-06	-2.293	0.021
b6	1.41E-06	6.25E-07	2.248	0.024

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 μm^3 a 120 μm^3 , Figura 27). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, las parroquias Yanuncay, El Batán, Sucre, San Blas, Cañaribamba y El Sagrario). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permitido por el TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA (150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ALARMA (250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), EMERGENCIA (350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).



F21: 24 DE JUNIO DE 2020	
Max	3.698 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Min	0.202 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Figura 27: Concentración del Material Particulado en el año 24/06/2020, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

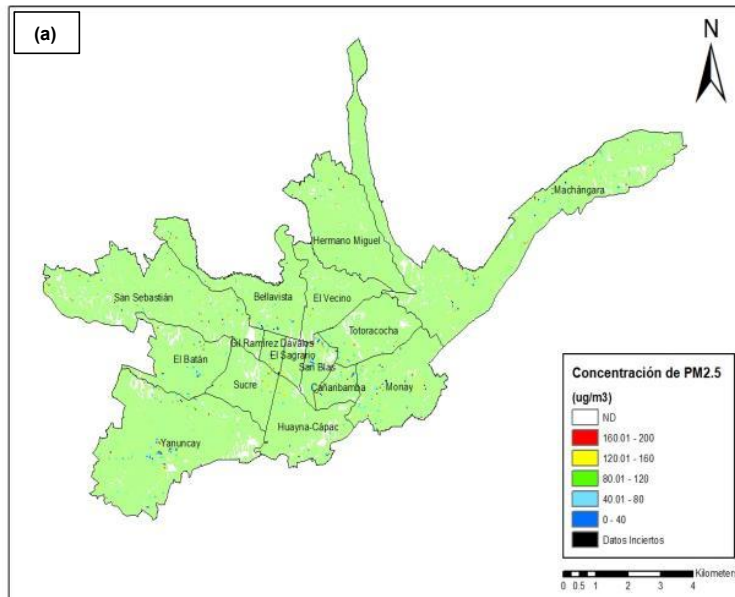
Se contempla los resultados que se obtuvo de las imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La tercera imagen del 2020 (F22: 11 de agosto de 2020) muestra la combinación de las bandas b1, b2, b3 y b6, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda b1 y b3 (b1, b3) tuvo una relación positiva, mientras que la banda b2 y b6 (b2, b6) negativa (Tabla 28).

Tabla 28. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 11/08/2020.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.13E+00	1.32E-02	161.435	<0.001
b1	4.22E-06	1.47E-06	2.866	0.004
b2	-5.76E-06	2.06E-06	-2.794	0.005
b3	1.89E-06	9.19E-07	2.056	0.039
b6	-2.58E-07	1.05E-07	-2.453	0.014

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 µg/m³ a 120 µg/m³, Figura 28). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, la parroquia Monay). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permisible del TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA (150 µg/m³), ALARMA (250 µg/m³), EMERGENCIA (350 µg/m³).



(b)	
F22: 11 DE AGOSTO DE 2020	
Max	14.987 µg/m ³
Min	1.205 µg/m ³

Figura 28: Concentración del Material Particulado en el año 11/08/2020, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 µg/m³, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

Se contempla los resultados que se obtuvo de las imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La cuarta imagen del 2020 (F23: 27 de agosto de 2020) muestra la combinación de las bandas B2 y B5, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda b5 (b5) tuvo una relación positiva, mientras que la banda 2 (b2) negativa (Tabla 29).

Tabla 29. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 27/08/2020.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.13E+00	2.10E-02	101.161	<0.001
b2	-7.90E-07	2.82E-07	-2.802	0.005
b5	4.13E-07	1.48E-07	2.786	0.005

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 μm^3 a 120 μm^3 , Figura 29). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, la parroquia Monay). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permitido por el TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA (150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ALARMA (250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), EMERGENCIA (350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

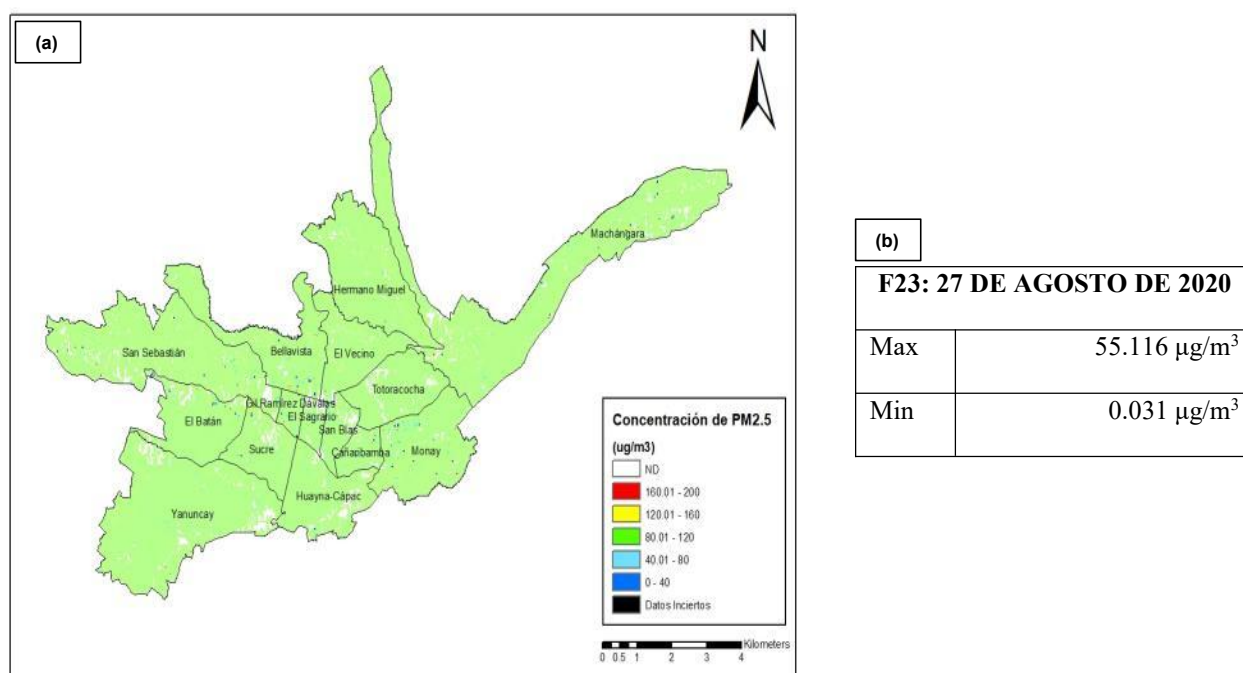


Figura 29: Concentración del Material Particulado en el año 27/08/2020, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 40.01 - 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

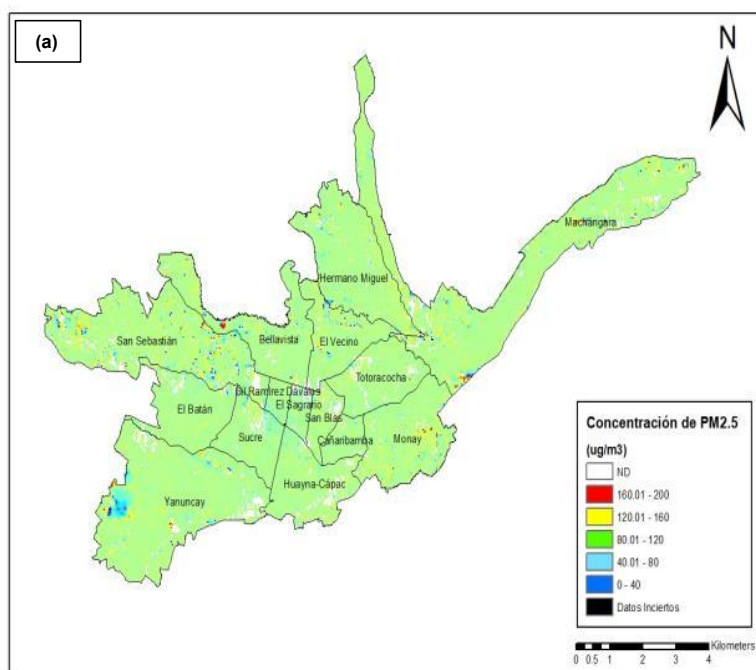
Se contempla los resultados que se obtuvo de las imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La quinta imagen del 2020 (F24: 28 de septiembre de 2020) muestra la combinación de las bandas b1 y b3, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda b3 (b3) tuvo una relación positiva, mientras que la banda 1 (b1) negativa (Tabla 30).

Tabla 30. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 28/09/2020.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.30E+00	2.71E-02	84.67	<0.001
b1	-2.45E-05	1.03E-05	-2.378	0.017
b3	2.07E-05	8.60E-06	2.404	0.016

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 μm^3 a 120 μm^3 , Figura 30). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, las parroquias Bellavista y Machángara). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permisible del TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA (150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ALARMA (250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), EMERGENCIA (350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).



(b)	
F24: 28 DE SEPTIEMBRE DE 2020	
Max	93.202 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Min	0.007 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Figura 30: Concentración del Material Particulado en el año 28/09/2020, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 80.01 - 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

4.2.9 Análisis multitemporal del contaminante del periodo 2021

Para el año 2021 se obtuvo tres imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La primera imagen del 2021 (F25: 23 de marzo de 2021) muestra la combinación de las bandas b1 y b4, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda 4 (b4) tuvo una relación positiva, mientras que la banda 1 (b1) negativa (Tabla 31). Todas las variables son significantes, pero la b4 tuvo una relación positiva y b1 negativa.

Tabla 31. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 23/04/2021.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.27E+00	2.76E-02	82.331	<0.001
b1	-7.93E-07	3.49E-07	-2.274	0.023
b4	6.05E-07	2.82E-07	2.149	0.032

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 μm^3 a 120 μm^3 , Figura 31). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, las parroquias Monay y San Sebastián). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permitido por el TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA (150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ALARMA (250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), EMERGENCIA (350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

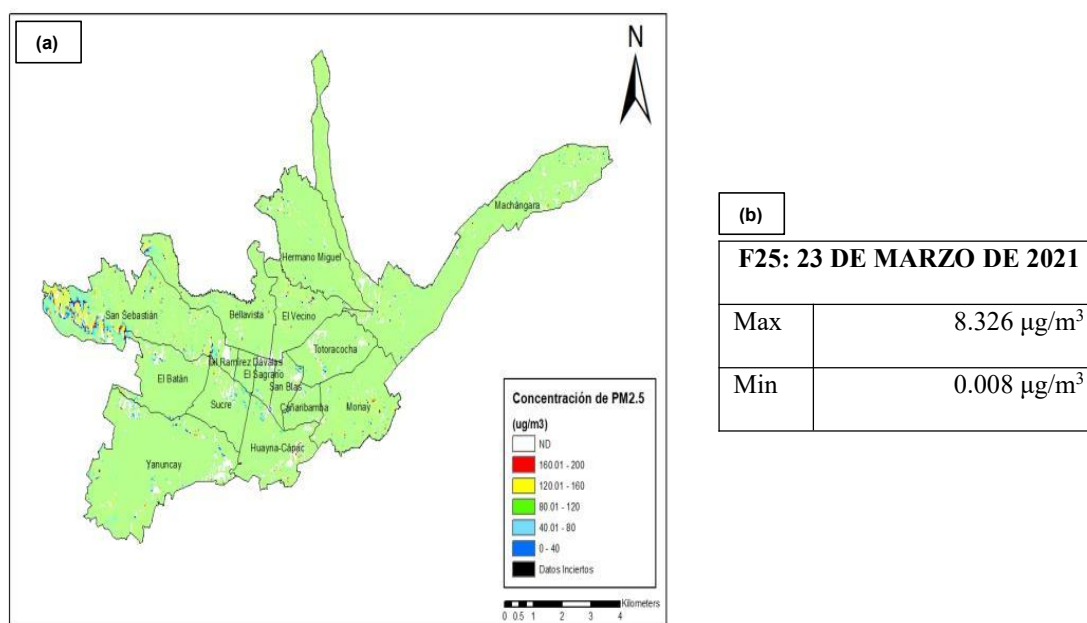


Figura 31: Concentración del Material Particulado en el año 23/03/2021, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

Se contempla los resultados que se obtuvo de las imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La segunda imagen del 2021 (F26: 27 de junio de 2021) muestra la combinación de las bandas b1, b5 y b6, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda 6 (b6) tuvo una relación positiva, mientras que la banda b1 y b6 (b1, b5) negativa (Tabla 32).

Tabla 32. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 27/06/2021.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.05E+00	1.44E-02	142.699	<0.001
b1	-1.13E-06	3.70E-07	-3.051	0.002
b5	-1.60E-07	4.95E-08	-3.227	0.001
b6	8.98E-07	2.50E-07	3.59	0.0003

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 μm^3 a 120 μm^3 , Figura 32). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, las parroquias Sucre, Huayna Cápac, Monay y Machángara). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permisible del TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA (150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ALARMA (250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), EMERGENCIA (350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

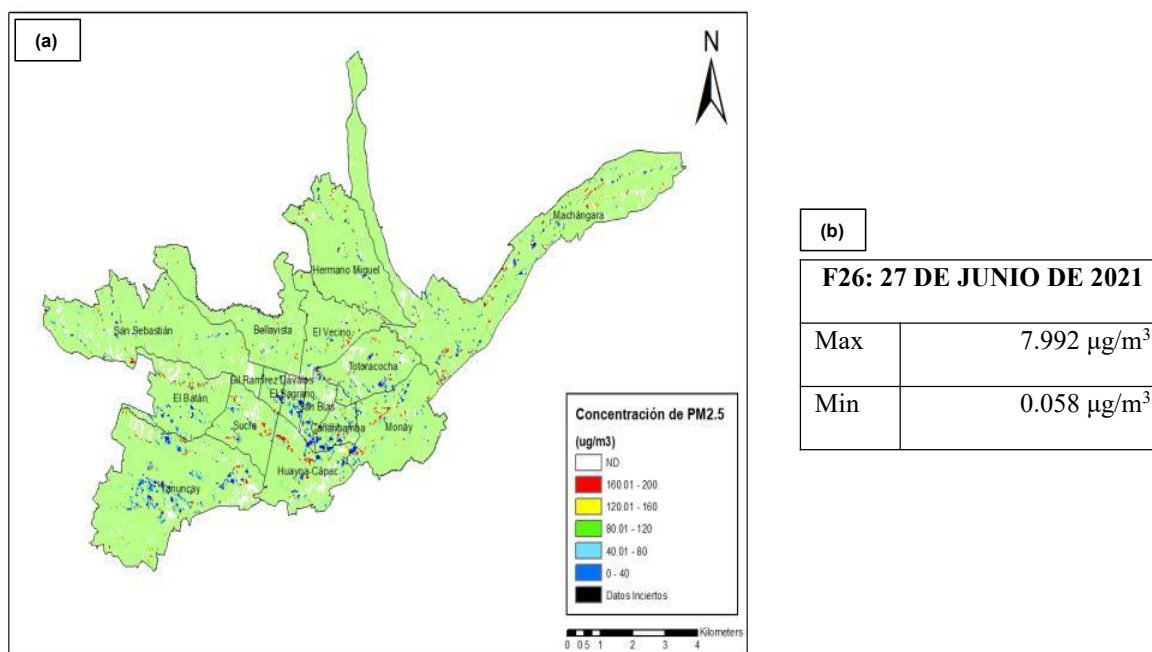


Figura 32: Concentración del Material Particulado en el año 27/06/2021, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

Se contempla los resultados que se obtuvo de las imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La tercera imagen del 2021 (F27: 14 de agosto de 2021) muestra la combinación de las bandas b3, b4, b5 y b6, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda b3 y b6 (b3, b6) tuvo una relación positiva, mientras que la banda b4 y b5 (b4, b5) negativa (Tabla 33).

Tabla 33. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 14/08/2021.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.43E+00	1.10E-02	221.922	<0.001
b3	1.97E-06	8.64E-07	2.28	0.022
b4	-2.05E-06	8.78E-07	-2.337	0.019
b5	-4.08E-07	1.68E-07	-2.422	0.015
b6	5.54E-07	2.71E-07	2.048	0.040

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 µg/m³ a 120 µg/m³, Figura 33). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, las parroquias El Sagrario, Huayna Cápac, Monay y Machángara). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permitido por el TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA (150 µg/m³), ALARMA (250 µg/m³), EMERGENCIA (350 µg/m³).

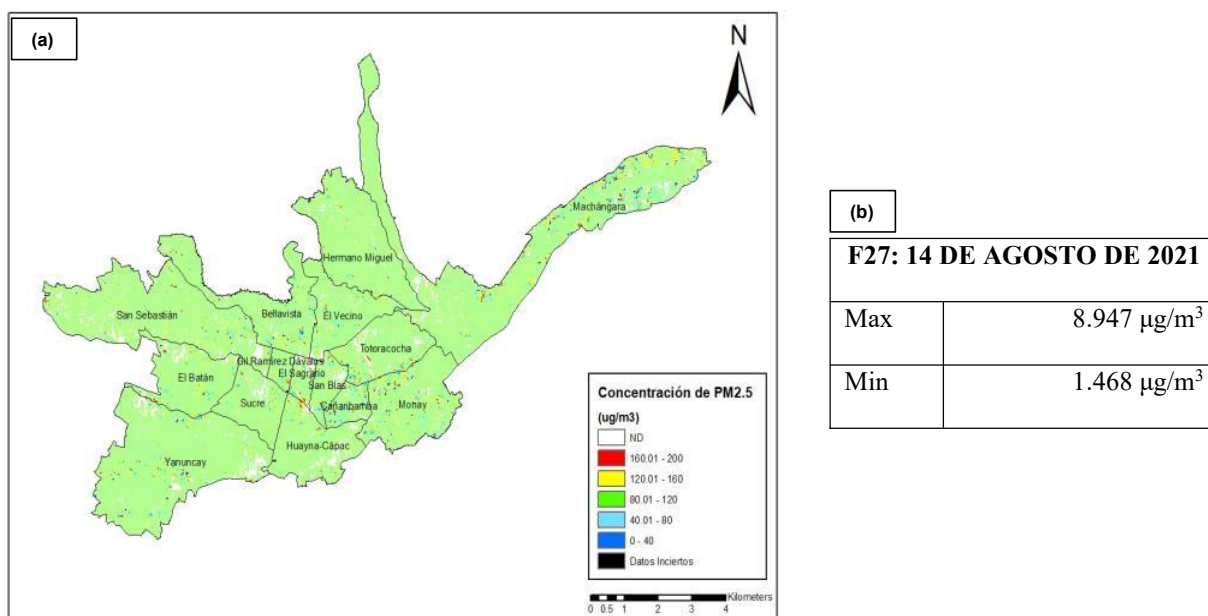


Figura 33: Concentración del Material Particulado en el año 14/08/2021, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 µg/m³, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

4.2.10 Análisis multitemporal del contaminante del periodo 2022

Para el año 2022 se obtuvo seis imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La primera imagen del 2022 (F28: 10 de marzo de 2022) muestra la combinación de las bandas b1 y b6, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda 1 (b1) tuvo una relación positiva, mientras que la banda 6 (b6) negativa (Tabla 34).

Tabla 34. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 10/03/2022.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.42E+00	1.31E-02	184.063	<0.001
b1	4.79E-06	1.29E-06	3.728	0.0001
b6	-3.26E-06	8.85E-07	-3.683	0.0002

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Figura 34). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, la parroquia Machángara). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permisible del TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA (150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ALARMA (250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), EMERGENCIA (350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

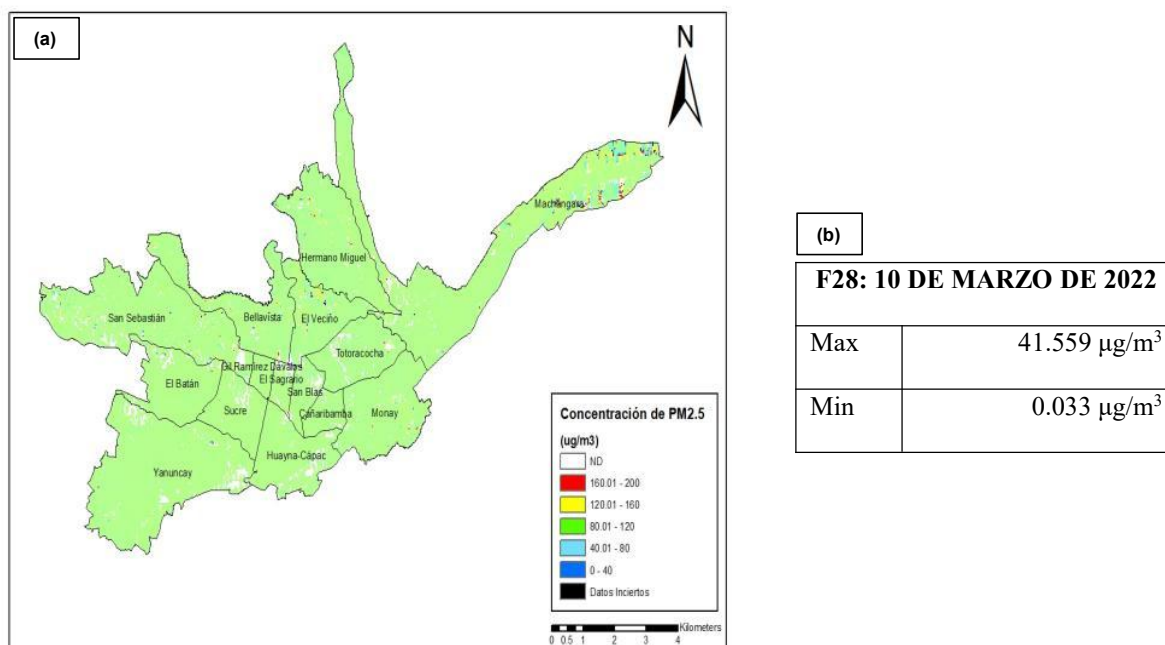


Figura 34: Concentración del Material Particulado en el año 10/03/2022, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 40.01 - 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

Se contempla los resultados que se obtuvo de las imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La segunda imagen del 2022 (F29: 17 de agosto de 2022) muestra la combinación de las bandas b3, b4 y b5, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda b3 (b3) tuvo una relación positiva, mientras que la banda b4 y b5 (b4, b5) negativa (Tabla 35).

Tabla 35. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 17/08/2022.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.76E+00	2.24E-02	123.652	<0.001
b3	5.49E-06	1.64E-06	3.34	0.0008
b4	-4.25E-06	1.36E-06	-3.128	0.001
b5	-6.28E-07	1.71E-07	-3.668	0.0002

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 µg/m³ a 120 µg/m³, Figura 35). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, las parroquias El Sagrario, San Sebastián, El Batán, Gil Ramírez Dávalos, El Vecino, Bellavista y Monay). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permisible del TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA (150 µg/m³), ALARMA (250 µg/m³), EMERGENCIA (350 µg/m³).

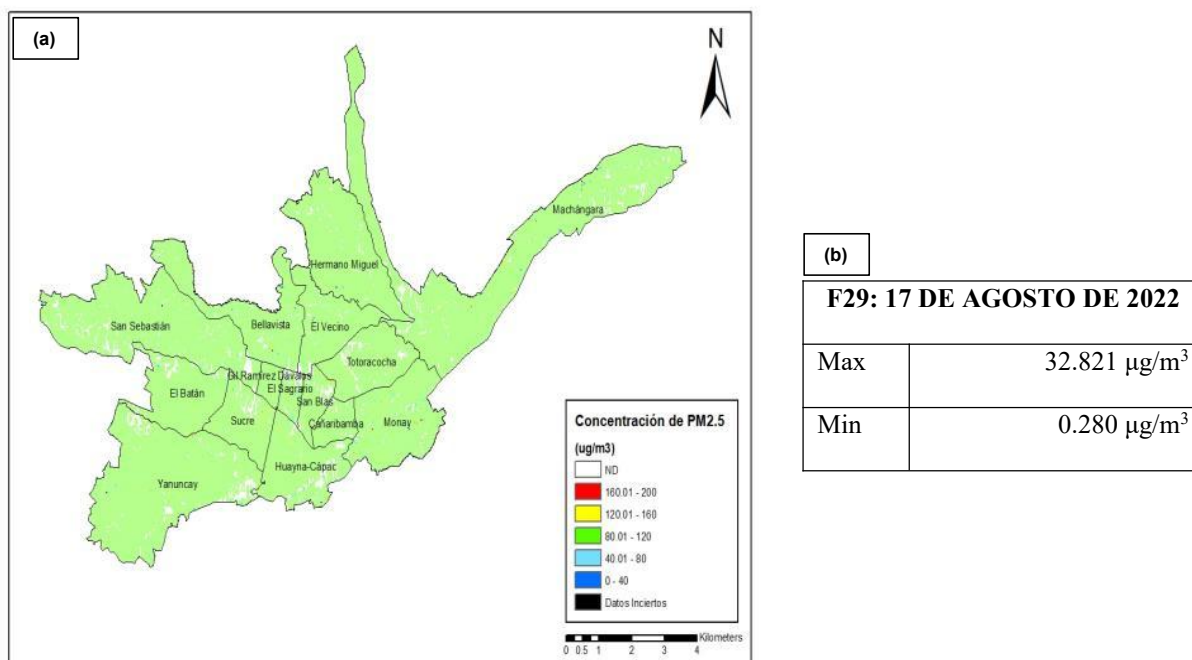


Figura 35: Concentración del Material Particulado en el año 17/08/2022, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 µg/m³, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

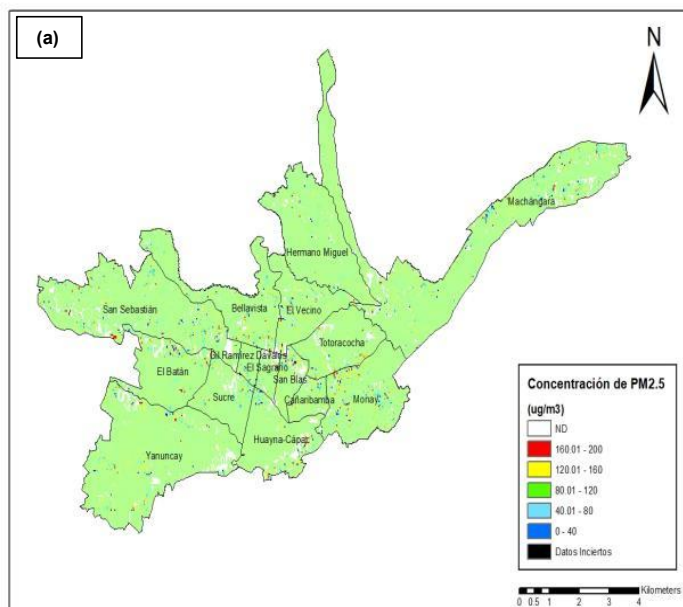
Se contempla los resultados que se obtuvo de las imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La tercera imagen del 2022 (F30: 02 de septiembre de 2022) muestra la combinación de las bandas b2, b4, b5 y b6, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda b4 y b5 (b4, b5) tuvo una relación positiva, mientras que la banda b2 y b6 (b2, b6) negativa (Tabla 36).

Tabla 36. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 02/09/2022.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	3.10E+00	1.05E-02	296.183	<0.001
b2	-5.65E-06	2.30E-06	-2.456	0.014
b4	6.69E-06	2.38E-06	2.809	0.004
b5	1.35E-06	4.96E-07	2.716	0.006
b6	-2.73E-06	1.01E-06	-2.709	0.006

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 µg/m³ a 120 µg/m³, Figura 36). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, las parroquias San Sebastián y Monay). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permisible del TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA (150 µg/m³), ALARMA (250 µg/m³), EMERGENCIA (350 µg/m³).



F30: 02 DE SEPTIEMBRE DE 2022	
Max	32.491 µg/m ³
Min	0.038 µg/m ³

Figura 36: Concentración del Material Particulado en el año 02/09/2022, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 µg/m³, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

Se contempla los resultados que se obtuvo de las imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La cuarta imagen del 2022 (F31: 18 de septiembre de 2022) muestra la combinación de las bandas b1, b2, b4 y b6, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda b2 y b6 (b2 y b6) tuvo una relación positiva, mientras que la banda b1 y b4 (b1, b4) negativa (Tabla 37).

Tabla 37. Modelos estadísticos de las imágenes multiespectrales de Landsat 8 para la determinación 18/09/2022.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	3.12E+00	1.10E-02	283.494	<0.001
b1	-1.04E-05	3.71E-06	-2.798	0.005
b2	1.31E-05	4.84E-06	2.714	0.006
b4	-8.65E-06	2.17E-06	-3.989	0.006
b6	3.98E-06	9.38E-07	4.248	0.002

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 µg/m³ a 120 µg/m³, Figura 37). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, las parroquias San Sebastián y Batán). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permitido por el TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA (150 µg/m³), ALARMA (250 µg/m³), EMERGENCIA (350 µg/m³).

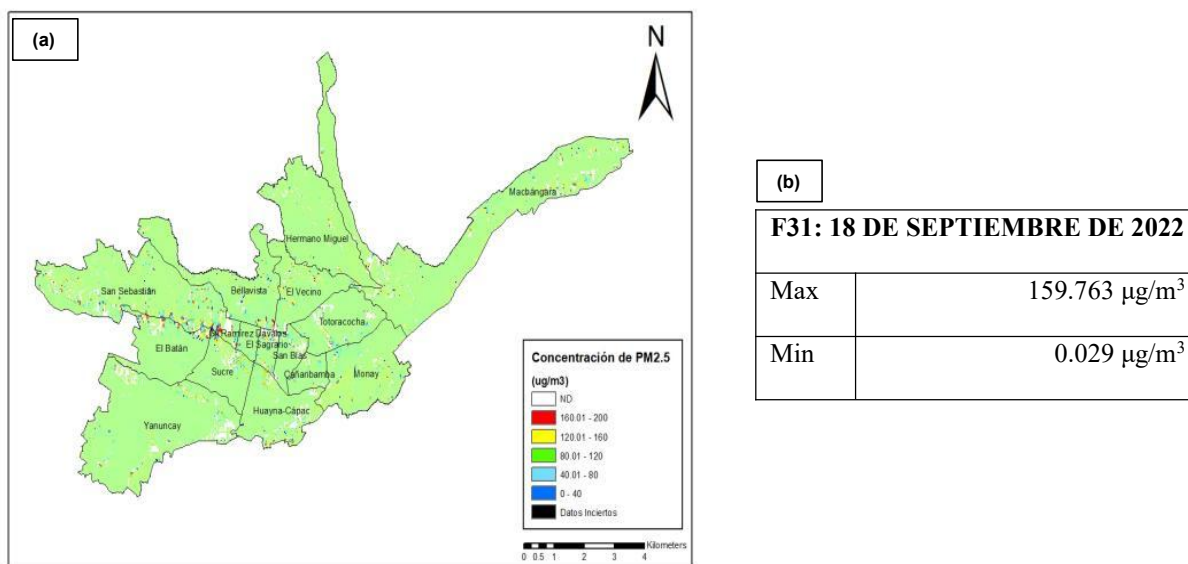


Figura 37: Concentración del Material Particulado en el año 18/09/2022, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 120.01 - 160 µg/m³, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

Se contempla los resultados que se obtuvo de las imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La quinta imagen del 2022 (F32: 05 de noviembre de 2022) muestra la combinación de las bandas 1, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda b1 (b1) tuvo una relación negativa (Tabla 38).

Tabla 38. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 05/11/2022.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.96E+00	1.57E-02	188.48	<0.001
b1	-1.74E-06	4.77E-07	-3.66	0.0002

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 μm^3 a 120 μm^3 , Figura 38). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, las parroquias Totoracocha y Huayna Cápac). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permisible del TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA (150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), ALARMA (250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), EMERGENCIA (350 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

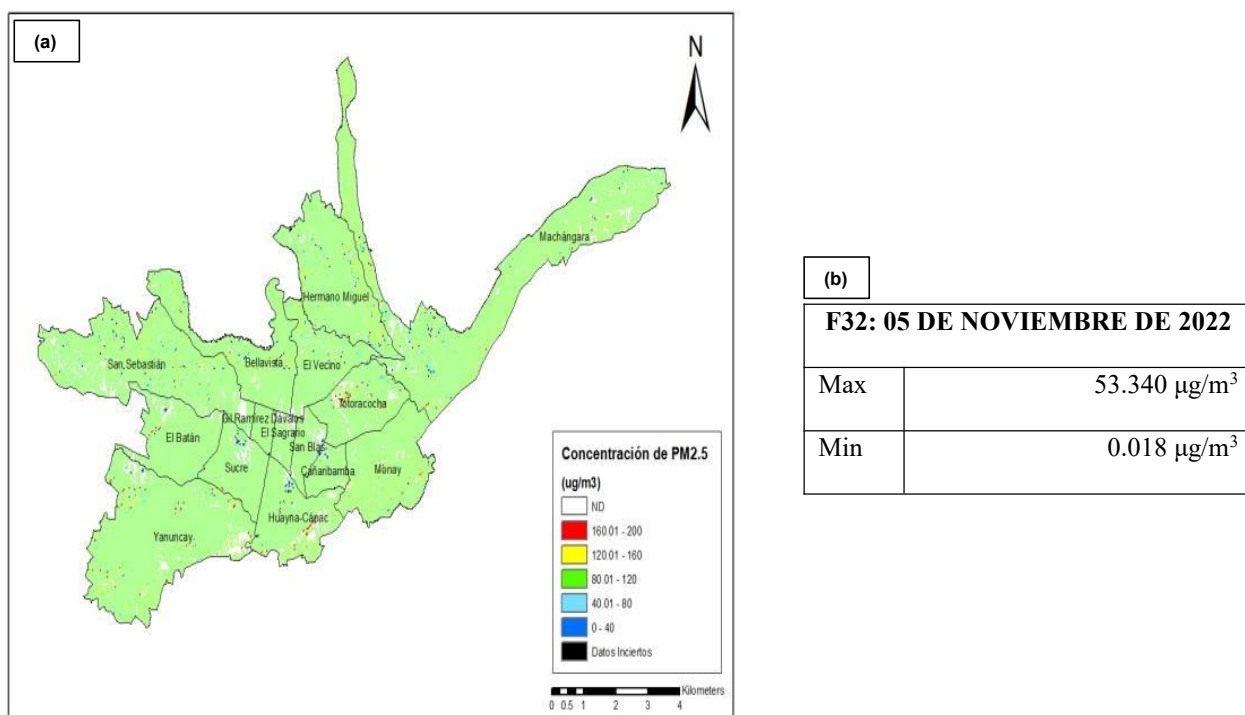


Figura 38: Concentración del Material Particulado en el año 05/11/2022, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 40.01 - 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

Se observa los resultados que se obtuvo de las imágenes con las características requeridas, las cuales se combinan con las concentraciones de PM_{2.5} de la EMOV EP de las mismas fechas. La sexta imagen del 2022 (F33: 21 de noviembre de 2022) muestra la combinación de las bandas b1, b2, b5 y b6, es la mejor que funciona. A pesar de que la banda b1, b2, b5 y b6 no presento significancia estadística (Tabla 39).

Tabla 39. Modelos estadísticos de las imágenes multispectrales de Landsat 8 para la determinación 21/11/2022.

ERROR				
COEFICIENTES	ESTIMAR	ESTÁNDAR	T VALOR	Pr(> t)
(INTERCEPT)	2.92E+00	1.30E-02	224.837	<0.001
b1	-1.01E-05	5.91E-06	-1.706	0.088
b2	8.14E-06	5.94E-06	1.371	0.17
b5	-1.22E-06	1.18E-06	-1.029	0.303
b6	2.23E-06	1.95E-06	1.142	0.253

Fuente: Autor

Para esta fecha se consignaron valores moderados de concentración de PM_{2.5} representados en color verde (80.01 µg/m³ a 120 µg/m³, Figura 39). Sin embargo, se puede observar que ciertas parroquias presentan concentraciones mayores (por ejemplo, las parroquias Yanuncay, Hermano Miguel y San Sebastián). No obstante, estos valores se encuentran por debajo del límite máximo permitido por el TULSMA, por debajo de los rangos de ALERTA (150 µg/m³), ALARMA (250 µg/m³), EMERGENCIA (350 µg/m³).

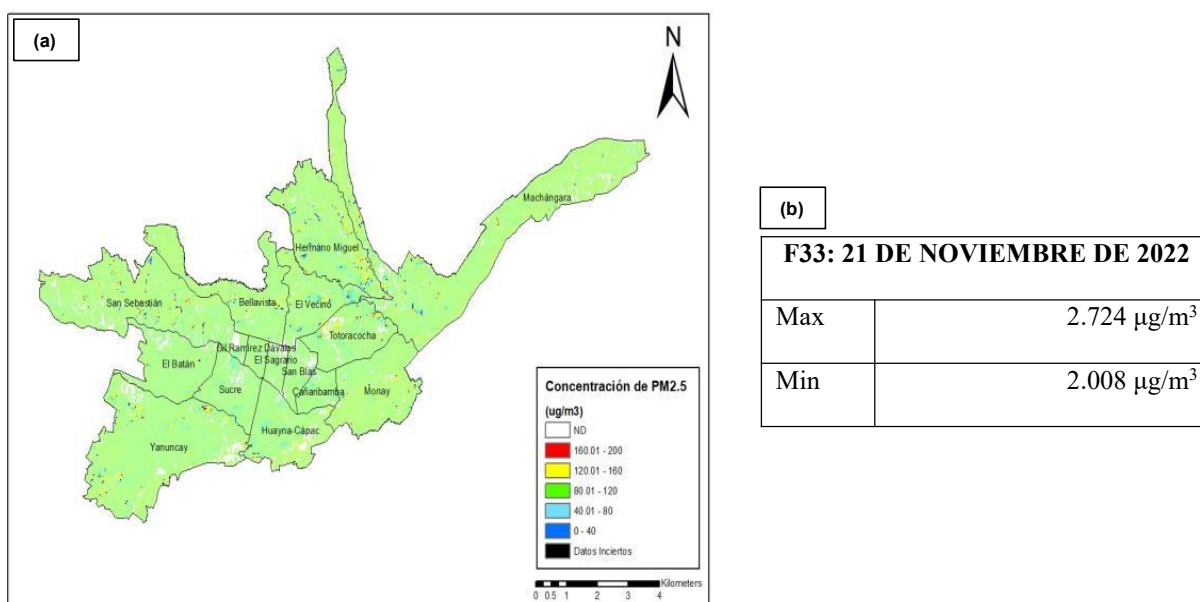


Figura 39: Concentración del Material Particulado en el año 21/11/2022, (a) Mapa de concentración de PM_{2.5} que están entre los rangos 0 - 40 µg/m³, (b) Límites máximos permisibles de 0 a 200 de concentración de PM_{2.5} de acuerdo al TULSMA

Fuente: Autor

4.3 Análisis de varianza de los datos obtenidos de las imágenes satelitales

Se ejecutó una prueba ANOVA de las concentraciones de $PM_{2.5}$. De las 528 posibles combinaciones de los resultados de la regresión entre las imágenes satelitales y datos de la EMOV EP determinadas en los años de análisis. En la que se pudo observar que el 43.93% de las fechas de $PM_{2.5}$ son similares. Por otra parte, los intervalos de confianza determinados exponen que en la F16 (25 de octubre del 2018) y en el año 2020 se obtienen las divergencias más considerables con respecto a los valores medios de concentración de $PM_{2.5}$ de todos los años analizados. De la misma manera, se observa que, en los años 2013, 2015, 2017 y 2022 se encuentran diferencias significativas de la información de concentración de $PM_{2.5}$, que se puede inferir a valores máximos y mínimos de concentración (Figura 40).

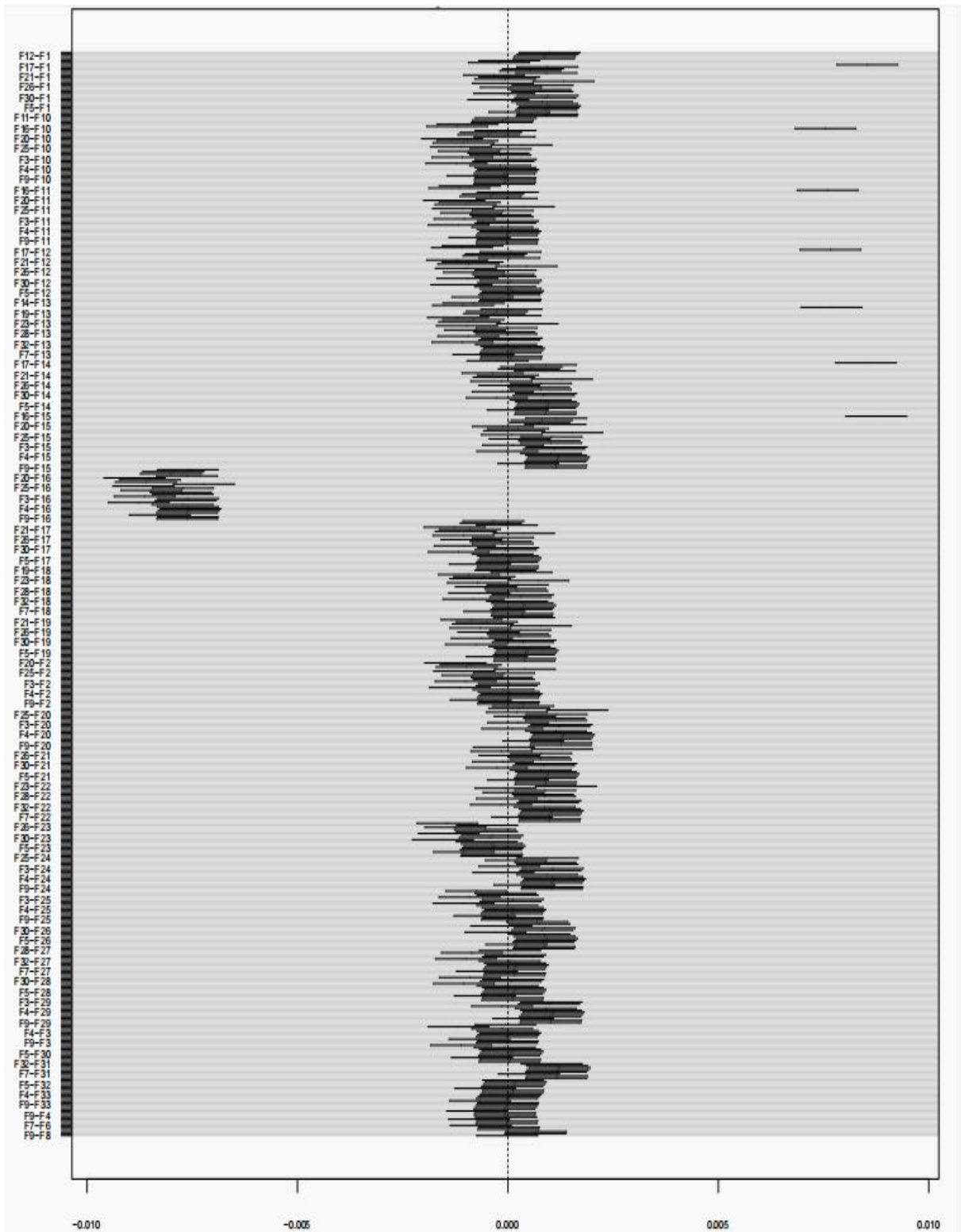


Figura 40: Análisis de varianza TUKEY error 95% de los datos de imágenes satelitales.

Fuente: Autor

4.4 Discusión

En la presente investigación se pudo observar una diferencia significativa de la concentración de $PM_{2.5}$ de las estaciones de la EMOV EP, entre los años y meses de estudio. Sin embargo, algunos años y meses dentro de la muestra presentaron concentraciones similares. Adicionalmente, se registró un incremento anual de la concentración de $PM_{2.5}$ desde 2013 al 2022. No obstante, en algunos años se pudo observar el declive de las concentraciones de $PM_{2.5}$, como en el año 2020 debido a la cuarentena por la pandemia del COVID-19. Por su parte, se obtuvo el efecto de diferentes longitudes de onda para cada fecha. Esto indica una variación de las características físicas de $PM_{2.5}$ en los diferentes años. Además, las mayores concentraciones se registraron especialmente en la zona del centro histórico de la ciudad de Cuenca. Con estos resultados, se pudo obtener las concentraciones de toda el área urbana de la ciudad para cada año, obteniéndose concentraciones fuera de los límites permisibles para ocho fechas. En el año 2014 se determinó concentraciones de $762.06 \mu\text{m}/\text{m}^3$ y $583.56 \mu\text{m}/\text{m}^3$, mientras que en el año 2016 se alcanzó concentraciones máximas de $195.50 \mu\text{m}/\text{m}^3$. Por otro lado, se observó concentraciones de $323.07 \mu\text{m}/\text{m}^3$ en el año 2017, a diferencia del año 2018 en el que se presentaron concentraciones de $1221.37 \mu\text{m}/\text{m}^3$, sin embargo, en el año 2019 se obtuvieron concentraciones de $232.39 \mu\text{m}/\text{m}^3$ y $289.49 \mu\text{m}/\text{m}^3$. Pese a que en el año 2020 se observó una tendencia al descenso de las concentraciones de material particulado $PM_{2.5}$ se determinaron concentraciones de $657.57 \mu\text{m}/\text{m}^3$. Finalmente, al comparar las concentraciones de $PM_{2.5}$ obtenidas de las regresiones lineales para cada fecha, se pudo observar que el 50.07% de los años tuvieron concentraciones similares.

Las concentraciones de $PM_{2.5}$ obtenidas de las estaciones de monitoreo CCA, MUN y EIE de la EMOV EP presentaron en su mayoría diferencias entre fechas, sin exceder los límites permitidos por la legislación ecuatoriana (Texto Unificado de Legislación Secundaria Del Ministerio Del Ambiente, 2017). En contraste con lo determinado por Palacios & Espinoza (2014), que entre los años 2009 al 2013 identificó que las concentraciones de $PM_{2.5}$ de la base de datos de la EMOV EP, superaban con al menos el $10 \mu\text{m}/\text{m}^3$ los valores permitidos en la normativa ambiental. Sin embargo, en línea con nuestros resultados, un análisis realizado entre los años 2012 al 2016 se observó que las concentraciones no sobrepasaron los valores establecidos por la normativa ambiental (Arcos-Medina et al., 2018). No obstante, en el estudio realizado por Parra et al. (2022), se encontró que las concentraciones el 31 de diciembre del 2021, a partir de las 21 horas, superaron los valores permitidos por la OMS, debido a la quema de monigotes y pirotecnia. Así también, en la ciudad Andina de Manizalez Gálvez et al. (2021), llevó a cabo un monitoreo de las concentraciones de $PM_{2.5}$ durante 10 días cerca de las vías principales, en donde se identificó que las mayores concentraciones se dieron en zonas de mayor flujo vehicular, especialmente de transporte público. Así también en Bogotá, Rojas & Boris (2005) realizó un estudio con tres estaciones de monitoreo automáticas, en el que determinó que las concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ varían en función de la hora y la zona en la que se toman los datos, ya que en horas pico en zonas industriales y vías de primer orden presentaron los valores más altos de concentración de material particulado. Al igual que Álvarez-Tolentino & Suárez-Salas (2020), puesto que encontraron que las principales ciudades del Mantaro de Perú las concentraciones más significativas de PM_{10} y $PM_{2.5}$ fueron en la zona urbana debido al tráfico vehicular.

El presente estudio muestra que las imágenes multiespectrales son una alternativa para determinar las concentraciones espaciales de $PM_{2.5}$. Esto en línea con lo encontrado por Torres y Vivanco (2008) que comprobaron que el uso adecuado de la combinación de colores de las bandas del satélite Landsat 8 son una herramienta tecnológica revolucionaria para establecer un grado de afectación en el ambiente en función de la variable estudiada. Por su parte, en un estudio realizado por Abad (2016), se observó que para la determinación de material particulado PM_{10} se utilizaron tan solo tres bandas que poseen longitudes de onda entre $0.45 \mu\text{m}$ a $12.51 \mu\text{m}$, que limita la cantidad de observaciones para realizar un análisis representativo. Teniendo en cuenta esto se realizaron combinaciones con las 6 bandas de las imágenes satelitales de Landsat 8 con rangos espectrales diferentes, que permitieron obtener las concentraciones de $PM_{2.5}$, dichas imágenes poseen una resolución espacial alta de 15 a 20 m/pixel, y un ciclo de repetición de al

menos 16 días (Tenjo et al., 2014). Entonces, en función de dichas combinaciones, se observó que los resultados presentaron valores de concentraciones bajas, a excepción de zonas específicas en las que se observaron concentraciones más elevadas. Ya que se encontró que la mayoría de los datos analizados no pertenecen a los rangos permitidos por la normativa ambiental. Por ejemplo, en la ciudad de Guayaquil se llevó a cabo un monitoreo continuo con datos satelitales entre los años 2015 y 2016, en los que no se identificaron riesgo ambiental (Moran-Zuloaga et al., 2021). De la misma manera, se realizó una correlación de datos terrestres y satelitales de concentraciones de PM_{2.5} en la ciudad de Quito por Zalakeviciute et al. (2021), durante el periodo de manifestaciones, en el que encontró una reducción diaria de concentraciones que se atribuye a la disminución del tráfico vehicular. Por otro lado, en Lima se desarrolló e implementó un modelo avanzado con una resolución espacial de 1 km² para estimar concentraciones diarias de PM_{2.5} y PM₁₀, que presentaron concentraciones mayores en épocas invernales (Vu et al., 2019).

La variación espacial de la concentración de PM_{2.5} en las parroquias urbanas de la ciudad de Cuenca presentan valores entre 80.01 µm/m³ a 120 µm/m³. Sin embargo, se encontraron valores más elevados en la zona del centro histórico de la ciudad. Ya que en la zona céntrica se encuentra gran cantidad de centros comerciales, así como la Catedral de la Inmaculada Concepción y el Mercado 10 de agosto, los que generan el incremento del volumen de vehículos y buses urbanos que circulan por el área diariamente, ocasionando congestión vehicular, generando mayor contaminación. Esto puede generar una problemática con el deterioro de estructuras y estatuas históricas están ligados a la acción constante de los agentes atmosféricos, y el centro histórico al ser declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO la conservación del patrimonio histórico y cultural es de extrema preocupación en la sociedad (Cornejo-Vasconez et al., 2022). Al igual que en las zonas centrales de la ciudad de Quito, que posee una altitud similar a la ciudad, se presentan fuertes concentraciones de tráfico vehicular, ya que se observaron las concentraciones más altas de PM_{2.5} (Zalakeviciute et al., 2018).

Mientras que la variación temporal más significativa se observa el 25 de octubre del año 2018, día en el que se presentan las máximas concentraciones del PM_{2.5}, fecha en la que se realizaron cierres de las intersecciones de la avenida de Las Américas, una de las vías principales de la ciudad, por obras del proyecto Tranvía Cuatro Ríos, ocasionando congestión vehicular en las horas pico (Zhingre, 2018). De la misma manera, los meses octubre, noviembre y diciembre presentan las concentraciones más elevadas de PM_{2.5} con niveles más elevados. Así también se encontró variaciones temporales significativas en el año 2020, lo que se puede atribuir al confinamiento a causa de la pandemia por el virus SARS-CoV 2, también denominado COVID-19, ya que este provocó que el gobierno tomara medidas como la cuarentena, lo disminuyó considerablemente la contaminación atmosférica, debido al cierre de las industrias e inmovilización de la población mundial (Lanchipa-Ale et al., 2020). Las variaciones temporales también se pueden atribuir a la humedad, considerando que en el estudio realizado por Ulloa et al. (2022), en una ciudad ubicada en los Andes centrales peruanos, se presentaron disparidades significativas en temporadas secas y húmedas, presentando mayores concentraciones en temporada seca. En el estudio realizado por Zalakeviciute et al. (2018), se identificó a las precipitaciones como un factor clave para la reducción de la concentración de PM_{2.5}.

Se debe tener en cuenta que la exposición continua al PM_{2.5} afecta tanto a los comerciantes y moradores de las zonas, ya que se dispersan partículas sólidas microscópicas que ingresan a los pulmones, ocasionando problemas severos en la salud, e incluso fallecimiento prematuro en personas con enfermedades cardio pulmonares, insuficiencia cardiaca, agudización de síntomas del asma, desarrollo de patologías respiratorias e incluso reducción de la función pulmonar. La población que se encuentra en constante exposición a niveles altos de material particulado tiene posibilidades altas de presentar síntomas por intervalos de tiempo (Gavilanes & Gavilanes, 2018).

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES

- En conclusión, la correlación de datos de estaciones permanentes de la EMOV EP con las diversas bandas de imágenes multiespectrales de la plataforma permitieron un mejor análisis de la concentración del material particulado de diámetro menor a 2.5 micrómetros, dado que permitieron una mejor visualización de la distribución espacio-temporal del contaminante, al identificar posibles errores en la recolección de datos, generando así resultados más apegados a la realidad.
- Las diversas combinaciones de las bandas espaciales b1 (Ultra Azul Coastal Aerosol), b2 (Azul), b3 (Verde), b4 (Rojo), b5 (Infrarrojo cercano NIR) y b6 (Infrarrojo de onda corta) presentaron los resultados más favorables para la elaboración de modelos de regresión lineal para la estimación de valores de dispersión de concentración de PM_{2.5}.
- En definitiva, las estaciones permanentes de la EMOV EP presentaron valores similares a los de las combinaciones de las bandas multiespectrales, que en conjunto permitieron un mejor análisis de datos en el espacio-tiempo.
- Las parroquias Machángara y Hermano Miguel presentaron los niveles de emergencia de concentración de PM_{2.5} en todos los años del periodo analizado, cuyos valores variaron entre 1221.37 a 195.50 superando los rangos de ALERTA (150 µg/m³), ALARMA (250 µg/m³) y EMERGENCIA (350 µg/m³), establecidos por el TULSMA.
- Los niveles de emergencia, según los valores establecidos por la normativa ambiental vigente, se presentaron en los años 2014, 2018 y 2020 en las parroquias El Sagrario y Bellavista, las cuales se encuentran en el centro histórico de la ciudad de Cuenca, presentaron los niveles de concentraciones más altos entre los periodos del año 2013 al 2022, esto se atribuye al tráfico vehicular tanto de carros particulares como buses urbanos que se da diariamente en la zona, debido a la gran afluencia de personas en esta zona.
- Los niveles de alarma se observaron en los años 2013 y 2017 en las parroquias El Sagrario, San Sebastián, Hermano Miguel y El Vecino, ya que son zonas de actividad comercial y tráfico vehicular constante.
- Los niveles de alerta se presentaron en los 2016, 2019 y 2022 en las parroquias El Batán, San Sebastián, Sucre, Huayna Cápac, El Sagrario, Hermano Miguel, Totoracocha, Machángara, Gil Ramírez Dávalos y Yanuncay, lo que se atribuye a la densidad poblacional, ya que son áreas extensas.
- Las concentraciones máximas en las parroquias urbanas de la ciudad se encontraron en el año 2018, lo que demostró que un factor como el cierre de vías o trabajos civiles generan cambios drásticos en la calidad del aire al ocasionar tráfico vehicular.
- La variación temporal de las concentraciones del PM_{2.5} más considerables de las parroquias urbanas de la ciudad de Cuenca se encontraron en el año 2018, en el que se observaron las mayores concentraciones en comparación con el año 2020, con un notable descenso de la concentración del contaminante debido a las medidas de confinamiento tomadas por el Gobierno a causa de la pandemia por el virus SARS COV-2 o también

conocido como COVID-19, en el que se dio el cierre de industrias e inmovilización de las personas.

- El estudio de la variación de la distribución espacial de las concentraciones del contaminante $PM_{2.5}$ permitió determinar las zonas específicas en las que la población se encuentra más expuesta a este, con el objetivo de tomar las medidas necesarias para su respectiva minimización.
- La variación temporal del material particulado de diámetro menor a 2.5 micrómetros permitió una visión global del aumento y descenso del contaminante a lo largo del periodo analizado, para comprobar si las medidas tomadas para el control de la emisión del contaminante son óptimas o no.

CAPÍTULO VI

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar la correlación de datos de concentraciones que se obtienen de por las estaciones de monitoreo de la EMOV EP e imágenes satelitales Landsat 8 de todos los contaminantes atmosféricos que establece la norma de calidad ambiental, que permita determinar la distribución espacio-temporal de todos ellos, para una mejor toma de decisiones al momento de elaborar planes de manejo ambiental por las autoridades competentes.
- El estudio de la variación temporal permite conocer el desarrollo de las concentraciones de $PM_{2.5}$ a lo largo del tiempo, por cuál se recomienda continuar con el análisis multitemporal para una mejor elaboración de planes de control en función de los factores que provocan el ascenso y descenso de las concentraciones en ciertas épocas del año.
- Se propone la ejecución de análisis estadísticos de la concentración de $PM_{2.5}$ en función de la temperatura, humedad y demografía, que permita una mejor interpretación de la influencia de estos en los valores de concentración.
- Se aconseja realizar un estudio del impacto a la salud que genera la continua exposición al contaminante $PM_{2.5}$ por los habitantes y comerciantes del centro histórico de la ciudad de Cuenca, identificando las diversas fuentes y la caracterización química de $PM_{2.5}$ en cada zona.
- Es indispensable tomar las medidas necesarias para el control del parque automotor que ingresa en el centro de la ciudad, con el objetivo de minimizar la concentración de material particulado con diámetro menor a 2.5 micrómetros, garantizando un ambiente sano para la población Cuencana.
- Para la minimización de la concentración de partículas de diámetro menor a 2.5 micrómetros se recomienda llevar a cabo un plan de desarrollo en el centro histórico de la ciudad, que mejore la descongestión vehicular a partir de promover el uso del transporte público y bicicleta, la modernización del parque automotor y la correcta planificación de actividades económicas y comerciales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad, 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* [Escuela de ingeniería ambiental]. Universidad de Cuenca.
- Álvarez-Tolentino, D., & Suárez-Salas, L. (2020). Apportionment of emission sources of PM10 and PM2.5 at urban sites of Mantaro Valley, Peru. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(4), 875–892. <https://doi.org/10.20937/RICA.53473>
- Apte, J., Brauer, M., Cohen, A., Ezzati, M., & Pope, C. A. (2018). Ambient PM2.5 Reduces Global and Regional Life Expectancy. *Environmental Science and Technology Letters*, 5(9), 546–551. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.8b00360>
- Arboleda, K. L., & Neto, A. N. (2021). *Modelos parametrizados de calidad de aire en base a sensores remotos en el Distrito Metropolitano de Quito entre los años 2016 al 2019* [Ingeniería Ambiental]. Universidad Politécnica Salesiana.
- Arcos-Medina, G., Armijos-Arcos, F., Oñate-Andino, M. A., Pastor, D., & Jerves-Cobo, R. (2018). Simulación para Estimación de Muertes por Cáncer de Pulmón por Contaminación Ambiental de PM2.5. *I. CIENCIA UNEMI*, 11(27), 97–110. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol11iss27.2018pp97-110p>
- Arrieta, A. J. (2016). DISPERSIÓN DE MATERIAL PARTICULADO (PM 10), CON INTERRELACIÓN DE FACTORES METEOROLÓGICOS Y TOPOGRÁFICOS. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 43–54.
- Constitución de la República del Ecuador, Pub. L. No. Registro Oficial 449 de 20-oct-2008 (2008). www.lexis.com.ec
- Baena, J., & Campo, M. (2020). *Evaluación de las concentraciones internas y externas de material particulado PM2,5 en dos instituciones educativas de la ciudad de Barranquilla, Atlántico* [Programa de Ingeniería Ambiental]. Universidad de la Costa.
- Bailón, P. F. (2018). *Determinación del daño genotóxico en población expuesta a material particulado MP2,5 mediante ensayo de micronúcleos en la zona Sur de la ciudad de Cuenca Ecuador* [Titulo de magister en el Análisis Biológico y Diagnostico de Laboratorio]. Universidad Técnica Particular de Loja.
- Barra, D. I. (2019). *Análisis del efecto del arbolado urbano sobre la absorción de material particulado respirable (MP2,5) mediante el software I-TREE ECO al interior del parque Ecuador en la ciudad concepción* [Carrera de Geografía]. Universidad de Chile.
- Bernal, C. (2019). *EOLO-Sistema para monitoreo de calidad del aire a partir de Internet de las Cosas*. Pontificia Universidad Javeriana.
- Cardona, C. (2021). *Herramienta para el monitoreo de dispersión de contaminantes en función a altura. Modalidad: Exploratorio*. Universidad EIA.
- Córdova-Mendoza, P., Barrios-Mendoza, T., & Córdova-Barrios, I. (2021). Primera caracterización de emisiones y calidad de aire en ICA, Perú. *Revista Cubana de Química*, 33, 138–152.
- Corral, J. (2017). *Monitoreo y Análisis de la Calidad del Aire en la Vía CUENCA-SAYAUSÍ - EL CAJAS*. Universidad Politécnica Salesiana.

- Cruz, A., & Jiménez, A. (2016). Evaluación de la contaminación del aire por microorganismos oportunistas y su relación con material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) en la localidad de Puente Aranda. *Ciencia Unisalle*. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/170
- Cuesta-Santos, O., López-Lee, R., González-Jaime, Y., Sosa-Pérez, C., Bolufé-Torres, J., García-Valdés, E., & Reyes-Hernández, F. (2020). Comportamiento del material particulado en La Habana. Valores experimentales. *Revista Cubana de Meteorología*, 26, 1–20. <https://eqrcode.co/a/HktBEP>
- EMOV EP. (2021). *Informe de Calidad Aire Cuenca*.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2023, May). *Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente*. EPA. <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>
- Escudero, P. (2017). *Material particulado y su incidencia en alteraciones respiratorias en los trabajadores de la construcción en viviendas rurales tipo MIDUVI* [Maestría en Seguridad e Higiene Industrial y Ambiental]. Universidad Técnica de Ambato.
- Estrada, A., Gallo, M., & Núñez, E. (2016). CONTAMINACION AMBIENTAL, SU INFLUENCIA EN EL SER HUMANO, EN ESPECIAL: EL SISTEMA REPRODUCTOR FEMENINO. *Revista Científica de La Universidad de Cienfuegos*, 8(3), 80–86. <http://rus.ucf.edu.cu/>
- Feenstra, B., Collier-Oxandale, A., Papapostolou, V., Cocker, D., & Polidori, A. (2020). The AirSensor open-source R-package and DataViewer web application for interpreting community data collected by low-cost sensor networks. *Environmental Modelling and Software*, 134, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104832>
- Felipe, V. (2022). *Efectos sobre la salud humana de la exposición al aire contaminado por partículas PM₁₀ y PM_{2,5}* [Trabajo de fin de Grado]. Universidad de la La Laguna.
- Frackiewicz, M. (2023a, May 2). *El uso de satélites en el monitoreo de la contaminación del aire*. TS2 SPACE.
- Frackiewicz, M. (2023b, May 27). *Técnicas de teledetección para mapear y monitorear la contaminación del aire*. TS2 SPACE. <https://ts2.space/es/tecnicas-de-teledeteccion-para-mapear-y-monitorear-la-contaminacion-del-aire/>
- Galarza, P., & Tinoco, D. F. (2022). *Determinación de concentración de Material Particulado PM_{2.5} con el uso de aeronaves tripuladas a distancia en el área del parque industrial de la ciudad de Cuenca* [Carrera de Ingeniería Ambiental]. Universidad de Cuenca.
- Gálvez, A., González, C., Franco, J., Morales, R., & Aristizábal, B. (2021). Monitoring of Fine Particulate Matter and Black Carbon, in Micro-Environments of Manizales Andean City: Pilot Study. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 20(39), 129–146.
- García, C. (2018). Concentración de Material Particulado PM_{2,5} en Función de la Humedad y Reflectancia Atmosférica Usando Imágenes Landsat - 8 en Lima Metropolitana, 2015 - 2016. *Rev. Pakamuros*, 6(1), 48–58.
- Gómez, C. (2017). Contaminación del aire en Medellín por PM₁₀ y PM_{2.5} y sus efectos en la salud. *Universidad Militar Nueva Granada*.
- Gómez Vargas, E., Obregón Neira, N., & Fernando Rocha Arango, D. (n.d.). *Métodos de segmentación de nubes en imágenes satelitales*.

- Gutiérrez, J., Quijano, M., & Quijano, A. (2012). Monitoreo y caracterización fisicoquímica del material particulado PM2.5 en Cúcuta - Norte de Santander - Colombia. *Revista de La Facultad de Ciencias Básicas*, 10, 24–38. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90326398008>
- Lanchipa-Ale, T., Moreno-Salazar, K., & Luque-Zúñiga, B. (2020). Perspectiva del COVID-19 sobre la contaminación del aire. *Revista de La Sociedad Científica Del Paraguay*, 25(2), 155–182. <https://doi.org/10.32480/rscp.2020.25.2.155>
- López, E. (2016). *Modelos Cartográficos en Agricultura y Medio Ambiente. Métodos de Cálculo de Cobertura Arbórea, Modelo de Distribución de Especies y Modelo de Pronóstico de Calidad de Aire* [Tesis Doctoral en Agroingeniería]. Universidad Politécnica de Valencia.
- Matus, P., & Oyarzún, M. (2019). Impact of particulate matter (PM2.5) and children's hospitalizations for respiratory diseases. a case cross-over study. *Revista Chilena de Pediatría*, 90(2), 166–174. <https://doi.org/10.32641/rchped.v90i2.750>
- Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, (2017). www.lexis.com.ec
- Moran-Zuloaga, D., Merchan-Merchan, W., Rodríguez-Caballero, E., Hernick, P., Cáceres, J., & Cornejo, M. (2021). Overview and Seasonality of PM10 and PM2.5 in Guayaquil, Ecuador. *Aerosol Science and Engineering*, 5(4), 499–515. <https://doi.org/10.1007/s41810-021-00117-2>
- Moscoso-Vanegas, D. L., Monroy-Morocho, L. M., Narváez-Vera, M. A., Espinoza-Molina, C., & Astudillo-Alemán, A. L. (2019). Phyto-toxic effect of particular material PM10 collected in the urban area of the city of Cuenca, Ecuador. *ITECKNE*, 16(1), 12–20. <https://doi.org/10.15332/iteckne.v16i1.2157>
- Ochoa, F. (2023, January 16). *¿Qué es un análisis multitemporal?* ARCGIEEK. <https://acolita.com/que-es-un-analisis-multitemporal/>
- Organización Mundial de la Salud. (2021). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire Materia particulada (MP2,5 y MP10), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono. Resumen ejecutivo.* <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/346062/9789240035461-spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Palacios, E., & Espinoza, C. (2014a). Contaminación del aire exterior. Cuenca-Ecuador, 2009-2013. Posibles efectos en la salud. *Revista de La Facultad de Ciencias Médicas Universidad de Cuenca*, 32(2), 6–17.
- Palacios, E., & Espinoza, C. (2014b). 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.
- Palacios, Í., & Moreno, D. (2022). Vista de Contaminación ambiental. *RECIMUNDO*, 6, 95–106. [https://doi.org/10.26820/recimundo/6.\(2\).abr.2022.93-103](https://doi.org/10.26820/recimundo/6.(2).abr.2022.93-103)
- Parra, R., Saud, C., & Espinoza, C. (2022). Simulating PM2.5 Concentrations during New Year in Cuenca, Ecuador: Effects of Advancing the Time of Burning Activities. *Toxics*, 10(5), 1–21. <https://doi.org/10.3390/toxics10050264>
- Peña, S. (2017). Impacto de la contaminación atmosférica en dos principales ciudades del Ecuador. *Revista Científica de La Universidad de Cienfuegos*, 10(2), 285–288. <http://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus>

- Puentes, G., & Solarte, H. (2023). *Análisis multitemporal del cambio de coberturas en la cuenca del Lago Guamuez (Pasto, Nariño) durante el periodo 1986-2016* [Especialización en Sistemas de Información Geográfica]. Universidad Antonio Nariño.
- Rendón, M. (2020). *Detección de cambios en la cobertura vegetal, mediante teledetección en el sitio Ramsar Manglares de Estuario interior del Golfo de Guayaquil "Don Goyo"* [Ingeniería Ambiental]. Universidad de Guayaquil.
- Rojas, N., & Boris, G. (2005). Relación entre PM_{2.5} y PM₁₀ en la ciudad de Bogotá. *Revista de Ingeniería*, 22, 54–60.
- Romero, F. (2016). La Teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *Revista AquaTIC*, 24. <http://www.revistaaquatic.com/aquatic/art.asp?t=p&c=196>
- Salgado, F., Carranco, S., Sellers, C., & Martínez, J. (2017). Sistema de monitoreo de la calidad del aire y ruido ambiental para la determinación de índices referenciales de contaminación basado en sensores remotos. *Universidad Verdad*, 73, 91–11.
- Sellers, C., & Espinoza, C. (2017). Publicación de contaminantes atmosféricos de la estación de monitoreo de la ciudad de Cuenca, utilizando servicios estándares OGC. *ACI Avances En Ciencias e Ingenierías*, 9(1). <https://doi.org/10.18272/ACI.V9I15.300>
- Tenjo, C., Ruiz-Verdú, A., Delegido, J., Peña, R., & Moreno, J. (2014). Determinación de componentes ópticamente activos en aguas continentales a partir de imágenes Landsat-8. *Revista UD y La Geomática*, 9, 37–46. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.udgeo.2014.9.a04>
- Torres, N., & Vivanco, V. (2018). *Comparación en la estimación de material particulado PM₁₀ usando imágenes satelitales Landsat 7, Landsat 8 y Modis en Quito*. Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito.
- Ubilla, C., & Yohannssen, K. (2017). Contaminación atmosférica efectos en la salud respiratorio en el niño. *Revista Médica Clínica Las Condes*, 28(1), 111–118.
- Ulloa, J., Álvarez-Tolentino, D. M., Peña, A., & Suarez-Salas, L. (2022). Sensores de bajo costo en la caracterización de partículas finas (PM_{2.5}) de una ciudad altoandina. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 24(3), 199–207. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.468>
- USGS. (2023). *Product Information - USGS*. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/product-information>
- Valdés, C. (2019). Contaminación Ambiental. *Avances*, 21(2), 138–138. <https://orcid.org/0000->
- Vu, B., Sánchez, O., Bi, J., Xiao, Q., Hansel, N., Checkley, W., Gonzales, G., Steenland, K., & Liu, Y. (2019). Developing an advanced PM_{2.5} exposure model in Lima, Peru. *Remote Sensing*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/rs11060641>
- Warthon, B., Miranda, I., Quispe, I. R., Ponce, R., Ramos, V. F., Zamalloa, A., Warthon, J., Tupayachi, R., & Zamalloa, M. (2023). Correlación de material particulado pm 2.5 en función a la humedad relativa - precipitación usando Python, en la ciudad del Cusco. *HUANCA ARACAYO*. <http://arxiv.org/abs/2303.00526>
- Yáñez, G. (2019). *Caracterización físico-química y espectral de suelos con actividad agropecuaria en la microcuenca del Río Blanco-Cayambe* [Carrera de Ingeniería Ambiental]. Universidad Central del Ecuador.

Zalakeviciute, R., Alexandrino, K., Mejía, D., Bastidas, M., Oleas, N., Gabela, D., Chau, P. N., Bonilla-Bedoya, S., Diaz, V., & Rybarczyk, Y. (2021). The effect of national protest in Ecuador on PM pollution. *Scientific Reports*, *11*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96868-6>

Zalakeviciute, R., López-Villada, J., & Rybarczyk, Y. (2018). Contrasted effects of relative humidity and precipitation on urban PM_{2.5} pollution in high elevation urban areas. *Sustainability (Switzerland)*, *10*(6). <https://doi.org/10.3390/su10062064>

ANEXOS

Anexo 1: Combinación de bandas en Landsat 8 para la determinación de las imágenes de concentración de PM_{2.5} en las fechas de análisis

Combinación de bandas en Landsat 8			
F1	4/5/2013	b 1	Ultra Azul (Coastal Aerosol)
		b 2	Azul
		b 3	Verde
F2	8/8/2013	b 1	Ultra Azul (Coastal Aerosol)
		b 2	Azul
		b 6	Infrarrojo de onda corta (AWIR 1)
F3	28/11/2013	b 1	Ultra Azul (Coastal Aerosol)
		b 2	Azul
		b 3	Verde
		b 4	Rojo
		b 5	Infrarrojo cercano (NIR)
F4	4/3/2014	b 1	Ultra Azul (Coastal Aerosol)
		b 5	Infrarrojo cercano (NIR)
		b 6	Infrarrojo de onda corta (AWIR 1)
F5	8/6/2014	b 3	Verde
		b 5	Infrarrojo cercano (NIR)
F6	26/7/2014	b 2	Azul
		b 4	Rojo
F7	30/10/2014	b 2	Azul
		b 6	Infrarrojo de onda corta (AWIR 1)
F8	13/7/2015	b 1	Ultra Azul (Coastal Aerosol)
		b 2	Azul
F9	15/9/2015	b 1	Ultra Azul (Coastal Aerosol)
		b 2	Azul
		b 4	Rojo

		b 5	Infrarrojo cercano (NIR)
F10	2/11/2015	b 2 b 3 b 4 b 5 b 6	Azul Verde Rojo Infrarrojo cercano (NIR) Infrarrojo de onda corta (AWIR 1)
F11	5/1/2016	b 4	Rojo
F12	20/11/2016	b 1 b 3 b 6	Ultra Azul (Coastal Aerosol) Verde Infrarrojo de onda corta (AWIR 1)
F13	20/9/2017	b 3 b 4 b 5 b 6	Verde Rojo Infrarrojo cercano (NIR) Infrarrojo de onda corta (AWIR 1)
F14	9/12/2017	b 4 b 6	Rojo Infrarrojo de onda corta (AWIR 1)
F15	10/1/2018	b 1 b 2 b 4 b 6	Ultra Azul (Coastal Aerosol) Azul Rojo Infrarrojo de onda corta (AWIR 1)
F16	25/10/2018	b 4 b 5 b 6	Rojo Infrarrojo cercano (NIR) Infrarrojo de onda corta (AWIR 1)
F17	29/1/2019	b 1 b 2 b 3 b 4 b 5	Ultra Azul (Coastal Aerosol) Azul Verde Rojo Infrarrojo cercano (NIR)
F18	25/8/2019	b 1 b	Ultra Azul (Coastal Aerosol) Azul

		2	
		b 6	Infrarrojo de onda corta (AWIR 1)
F19	15/12/2019	b 1 b 4 b 5 b 6	Ultra Azul (Coastal Aerosol) Rojo Infrarrojo cercano (NIR) Infrarrojo de onda corta (AWIR 1)
F20	21/4/2020	b 1 b 2 b 6	Ultra Azul (Coastal Aerosol) Azul Infrarrojo de onda corta (AWIR 1)
F21	24/6/2020	b 1 b 6	Ultra Azul (Coastal Aerosol) Infrarrojo de onda corta (AWIR 1)
F22	11/8/2020	b 1 b 2 b 3 b 6	Ultra Azul (Coastal Aerosol) Azul Verde Infrarrojo de onda corta (AWIR 1)
F23	27/8/2020	b 2 b 5	Azul Infrarrojo cercano (NIR)
F24	28/9/2020	b 1 b 3	Ultra Azul (Coastal Aerosol) Verde
F25	23/3/2021	b 1 b 4	Ultra Azul (Coastal Aerosol) Rojo
F26	27/6/2021	b 1 b 5 b 6	Ultra Azul (Coastal Aerosol) Infrarrojo cercano (NIR) Infrarrojo de onda corta (AWIR 1)
F27	14/8/2021	b 3 b 4 b 5 b 6	Verde Rojo Infrarrojo cercano (NIR) Infrarrojo de onda corta (AWIR 1)
F28	10/3/2022	b 1 b 6	Ultra Azul (Coastal Aerosol) Infrarrojo de onda corta (AWIR 1)

F29	17/8/2022	b 3	Verde
		b 4	Rojo
		b 5	Infrarrojo cercano (NIR)
F30	2/9/2022	b 2	Azul
		b 4	Rojo
		b 5	Infrarrojo cercano (NIR)
		b 6	Infrarrojo de onda corta (AWIR 1)
F31	18/9/2022	b 1	Ultra Azul (Coastal Aerosol)
		b 2	Azul
		b 4	Rojo
		b 6	Infrarrojo de onda corta (AWIR 1)
F32	5/11/2022	b 1	Ultra Azul (Coastal Aerosol)
F33	21/11/2022	b 1	Ultra Azul (Coastal Aerosol)
		b 2	Azul
		b 5	Infrarrojo cercano (NIR)
		b 6	Infrarrojo de onda corta (AWIR 1)

Anexo 2: Código para el análisis en el software R

```
rm(list = ls())
setwd("C:/Users/59398/Music/Tesis")
list.files()
```

DATOS DE LA EMOV EP

```
df = read.csv("./Contaminacion del aire/PM252013-2022.csv",header = T)
head(df)
df$mes <- factor(df$mes,
  levels = c('Enero','Febrero',
    'Marzo','Abril',
    'Mayo','Junio',
    'Julio','Agosto',
    'Septiembre','Octubre',
    'Noviembre','Diciembre'),ordered = TRUE)
head(df)
str(df)
fe1 = df[df$year=="2013"&df$mes=="Mayo",]
head(fe1)
str(fe1)
fe2 = df[df$year=="2013"&df$mes=="Julio",]#No hay agosto
head(fe2)
str(fe2)
```

MODELOS LINEALES

```
#MODELOS2013#
library(raster)
par(mar=c(2,6,1.5,.5))
par(mfrow=c(3,1))
hist(df$pm25,main="EMOV EP")
coor <- read.csv("./Contaminacion del aire/coor.csv",header = T,row.names = 1)
coor
#2013 Mayo
b1 <- raster("./Tesis_Imagenes_Satelitales/2013/Corrección_topográfica2013-05-04/2013_B1.TIF") #Blue (475 nm center, 32 nm bandwidth)
b2 <- raster("./Tesis_Imagenes_Satelitales/2013/Corrección_topográfica2013-05-04/2013_B2.TIF")#Green (560 nm center, 27 nm bandwidth)
b3 <- raster("./Tesis_Imagenes_Satelitales/2013/Corrección_topográfica2013-05-04/2013_B3.TIF")#Red (668 nm center, 14 nm bandwidth)
b4 <- raster("./Tesis_Imagenes_Satelitales/2013/Corrección_topográfica2013-05-04/2013_B4.TIF")#Red edge (717 nm center, 12 nm bandwidth)
b5 <- raster("./Tesis_Imagenes_Satelitales/2013/Corrección_topográfica2013-05-04/2013_B5.TIF")#Near-IR (842 nm center, 57 nm bandwidth)
b6 <- raster("./Tesis_Imagenes_Satelitales/2013/Corrección_topográfica2013-05-04/2013_B6.TIF")#pancro load raster, third band (swir1, g=363)
b7 <- raster("./Tesis_Imagenes_Satelitales/2013/Corrección_topográfica2013-05-04/2013_B7.TIF")#termica load raster, first band (swir2, g=423)
graphics.off()

library(dismo)
#install.packages("rts")
library(rts)

bandValue <- function(x){
  cell_b1 <- raster::cellFromXY(x, coor[,c(4,3)])
  adj_b11 <- raster::adjacent(x, cell_b1, directions = 4)
  adj_b12 <- raster::adjacent(x, adj_b11[, "to"], directions = 4)
  neighbours <- (c(adj_b11[, "to"],adj_b11[, "from"], adj_b12[, "to"],adj_b12[, "from"]))
  adj_b13 <- raster::adjacent(x, neighbours, directions = 4)
  neighbours <- (c(adj_b11[, "to"],adj_b11[, "from"],
    adj_b12[, "to"],adj_b12[, "from"],
    adj_b13[, "to"],adj_b13[, "from"]))
  bik3<-(raster::xyFromCell(x, neighbours))
  b1k3 <- raster::extract(x, bik3)
  str(b1k3)
  set.seed(10)
  b1k3 <- sample((b1k3), 502)
  print(b1k3)
}

b1k = bandValue(b1)
b2k <- bandValue(b2)
b3k <- bandValue(b3)
b4k <- bandValue(b4)
b5k <- bandValue(b5)
```

```

b6k <- bandValue(b6)
b7k <- bandValue(b7)
str(b7k)

hist(fe1$pm25)
str(fe1)
glm25 <- glm(fe1$pm25 ~ b1k+b2k+b3k,
             family = quasipoisson)
summary(glm25)
plot(b1)
plot(b5)

pm25F1 <- 2.089e+00+(-3.590e-05*b1)+(5.701e-05*b2)+(-1.966e-05*b3)
plot(pm25F1)
pm25F1
EMOV= as.data.frame(pm25F1)
EMOV= na.omit(EMOV)
plot(EMOV)
summary(EMOV$layer,na.rm= T)
#writeRaster(pm25F1, ".\Bandas\F12013_05_04.TIF")

```

FECHA PLOTS COLORES

```

library(dplyr)
library(ggplot2)
pm25a <- df %>%
ggplot(aes(x = Date, y = AQL_pm25, color = year, group = year)) +
  geom_smooth(method = "gam", se = T, size = 0.5) +
  # facet_grid(DivLinea~.)+
  # scale_y_sqrt()+
  theme_bw()+
  theme(
    plot.background = element_blank(),
    panel.grid.major = element_blank(),
    panel.grid.minor = element_blank())+
  theme(legend.position = "") +
  # scale_x_datetime(
  # date_breaks = "24 hour",
  # labels = date_format("%H:%M\n%b%d")))+
  # labels = date_format("%b%d")
  # ) +
  labs(x = "", y = "PM 2.5 (ug/m3)", color = "year")+
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust=1))#+
#geom_vline(xintercept = (so2$Date[c(4000,14000,23000,33000,43000)]), linetype="longdash",
# color = "black", size=1)

```

pm25a

```

pm25m <- df %>%
ggplot(aes(x = Date, y = AQL_pm25, color = mes, group = mes)) +
  geom_smooth(method = "gam", se = T, size = 0.5) +
  # facet_grid(DivLinea~.)+
  # scale_y_sqrt()+
  theme_bw()+
  theme(
    plot.background = element_blank(),
    panel.grid.major = element_blank(),
    panel.grid.minor = element_blank())+
  theme(legend.position = "top") +
  # scale_x_datetime(
  # date_breaks = "24 hour",
  # labels = date_format("%H:%M\n%b%d")))+
  # labels = date_format("%b%d")
  # ) +
  labs(x = "", y = "PM 2.5 (ug/m3)", color = "mes")+
  theme(axis.text.x = element_text(angle = 90, vjust = 0.5, hjust=1))#+
#geom_vline(xintercept = (so2$Date[c(4000,14000,23000,33000,43000)]), linetype="longdash",
# color = "black", size=1)

```

pm25m

```
get_palette(palette = "default", 5)
```

ANOVA DATOS DE LA EMOV EP

```

#PM25 year
par(mar = c(2,6.5,0,1))

```

```

par(mfrow=c(1,1))
pm25asy <- aov(df$pm25 ~ as.factor(df$year))
summary(pm25asy)
#perform Dunn's Test with Bonferroni correction for p-values
pm25tsy <- TukeyHSD(pm25asy, conf.level=.95)
pm25tsy
plot(pm25tsy,las=1,cex.axis=.7)
text(8,45, "Año",cex = 2)

```

```

#PM25 mes
pm25asm <- aov(df$pm25 ~ as.factor(df$mes))
summary(pm25asm)
#perform Dunn's Test with Bonferroni correction for p-values
pm25tsm <- TukeyHSD(pm25asm, conf.level=.95)
pm25tsm
plot(pm25tsm,las=1,cex.axis=.6,yaxt='s')
#axis(2, at = c(1:53),labels=NA)
text(4,66, "Mes",cex = 2)

```

MODELOS DE TODOS LOS AÑOS

```

f1 = raster("Bandas/Modelos2013_05_04.TIF")
f1
values(f1)
plot(f1)

```

```

f1t = as.data.frame(f1, xy=T)
f1t$Fecha = "F1"
head(f1t)
colnames(f1t) = c("x", "y", "Modelos", "Fecha")
head(f1t)

```

###Se hace el boxplot de 0 a 1###

```

aa2=((aa1$Modelos2013_05_04) - min((aa1$Modelos2013_05_04), na.rm = T)) * 1 / (max((aa1$Modelos2013_05_04), na.rm = T) -
min((aa1$Modelos2013_05_04), na.rm = T)) + 0
aa2

```

```

aa3 = data.frame(x=aa1$x,y=aa1$y,value=aa2)
aa3
str(aa3)

```

```

data_raster1 <- rasterFromXYZ(aa3) # Convert data frame to raster object
data_raster1 # Print raster object
crs(data_raster1)= "+proj=longlat +datum=WGS84 +no_defs"
plot(data_raster1)
#writeRaster(data_raster1, "./Bandas/data_raster1.TIF",overwrite=T)

```

ANOVA MODELOS

```

total = rbind(f1t,f2t,f3t,f4t,f5t,f6t,f7t,f8t,f9t,f10t,f11t,f12t,
f13t,f14t,f15t,f16t,f17t,f18t,f19t,f20t,f21t,f22t,
f23t,f24t,f25t,f26t,f27t,f28t,f29t,f30t,f31t,f32t,f33t)

```

```

head(total)
str(total)

```

```

fechaas <- aov(total$Modelos ~ as.factor(total$Fecha))
summary(fechaas)
#perform Dunn's Test with Bonferroni correction for p-values
fechats <- TukeyHSD(fechaas, conf.level=.95)
fechats
fechats$`as.factor(total$Fecha)`
write.table(fechats$`as.factor(total$Fecha)`,"modelosCompYear.txt")
write.csv(fechats$`as.factor(total$Fecha)`,"modelosCompYear.csv")
par(mar = c(2,3,2,0.1,1))
par(mfrow=c(1,1))
plot(fechats,las=1,cex.axis=.5)

```

ANÁLISIS DE VARIANZA

```

str(totalBellavistaF)
str(totalCanaribambaF)

```

```

T1 = merge(totalBellavistaF,totalCanaribambaF,
  by=c("fecha", "total", "parroquia", "date"), all=T)
T1
T2 = merge(T1, totalElbatanF,
  by=c("fecha", "total", "parroquia", "date"), all=T)
T2
T3 = merge(T2,totalElsagrarioF,
  by=c("fecha", "total", "parroquia", "date"), all=T)
T3
T4 = merge(T3,totalElvecinoF,
  by=c("fecha", "total", "parroquia", "date"), all=T)
T4
T5 = merge(T4, totalGilramirezdavalosF,
  by=c("fecha", "total", "parroquia", "date"), all=T )
T5
T6 = merge(T5, totalHermanomiguelF,
  by=c("fecha", "total", "parroquia", "date"), all=T)
T6
T7 = merge(T6, totalHermanomiguelF,
  by=c("fecha", "total", "parroquia", "date"), all=T )
T7
T8 = merge(T7, totalHuaynacapacF,
  by=c("fecha", "total", "parroquia", "date"), all=T )
T8
T9 = merge(T8, totalMachangaraF,
  by=c("fecha", "total", "parroquia", "date"), all=T )
T9
T10 = merge(T9, totalMachangaraF,
  by=c("fecha", "total", "parroquia", "date"), all=T)
T10
T11 = merge(T10, totalMonayF,
  by=c("fecha", "total", "parroquia", "date"), all=T )
T11
T12 = merge(T11, totalSanblasF,
  by=c("fecha", "total", "parroquia", "date"), all=T )
T12
T13 = merge(T12, totalSansebastianF,
  by=c("fecha", "total", "parroquia", "date"), all=T )
T13
T14 = merge(T13, totalSucreF,
  by=c("fecha", "total", "parroquia", "date"), all=T )
T14
T15 = merge(T14, totalTotoracochoaF,
  by=c("fecha", "total", "parroquia", "date"), all=T )
T15
TOTAL = merge(T15, totalYanuncayF,
  by=c("fecha", "total", "parroquia", "date"), all=T )

```

```

TOTAL
tail(TOTAL)
str(TOTAL)

```

```

install.packages("FSA")
library(FSA)
dunnTest(TOTAL$total ~ as.factor(TOTAL$date),
  method="bonferroni")

```

```

#fecha
par(mar = c(2,3,2,0.1,1))
par(mfrow=c(1,1))
fechaas <- aov(TOTAL$total ~ as.factor(TOTAL$date))
summary(fechaas)
#perform Dunn's Test with Bonferroni correction for p-values
fechats <- TukeyHSD(fechaas, conf.level=.95)
fechats$`as.factor(TOTAL$date)`
plot(fechats,las=1,cex.axis=.5)
text(-14,45, "CO",cex = 2)

```

```

#write.table(TOTAL,"TOTAL.txt")
TOTAL$parroquia = TOTAL[1:142428,]

```

SE CORTA EL ÁREA URBANA DE LA PARROQUIA DE LA CIUDAD DE CUENCA DESDE EL 2013 A 2022

####2013-05-04B1####

```

library(sf)
library(terra)
library(raster)

mdt = raster("./My Music/Tesis/Tesis_Imagenes_Satelitales/DEM/DEM.tif")
e = raster::extent(-79.0766,-78.8855,-2.9395, -2.8181)
mdte = raster::crop(mdt,e)
mdteSGD <- as(mdte, 'SpatialGridDataFrame')
plot(mdteSGD)
# require slope and aspect for topographic correction
mdt.slopeasp <- slopeasp(mdteSGD)
str(mdt.slopeasp)

sr <- "+proj=longlat +datum=WGS84 +no_defs"#proyectar

#Imagen Satelital2013
b113 = raster("./My Music/Tesis/Tesis_Imagenes_Satelitales/2013/2013-05-04/LC08_L2SP_010062_20130504_20200912_02_T1_SR_B1.TIF")

# Project Raster
b113p <- projectRaster(b113, crs = sr)
b113pr <- resample(b113p,mdte,method='ngb', filename="")
b113pe = raster::crop(b113p,e)

#Corrección _Topografica
b113peSGD <- as(b113pe, 'SpatialGridDataFrame')
b113peSGD.topo <- topocorr(b113peSGD, mdt.slopeasp$slope,
                           mdt.slopeasp$aspect, sunelev=57.99643324, sunazimuth=52.70834608)

b1tp13 <- as(b113peSGD.topo, "RasterLayer")

#(b1tp13, "./My Music/Tesis/Tesis_Imagenes_Satelitales/Corrección_topográfica/2013_B2.TIF")

```

SE HACE EL REZAMPOOL DE LOS PIXELES 2022-11-21F7

```

library(sf)
library(terra)
library(raster)
mdt = raster("./Tesis_Imagenes_Satelitales/DEM/DEM.tif")
e = raster::extent(-79.0766,-78.8855,-2.9395, -2.8181)
mdte = raster::crop(mdt,e)
mdteSGD <- as(mdte, 'SpatialGridDataFrame')
plot(mdteSGD)
# require slope and aspect for topographic correction
mdt.slopeasp <- slopeasp(mdteSGD)
str(mdt.slopeasp)

sr <- "+proj=longlat +datum=WGS84 +no_defs"#proyectar

#magen Satelital2022
b722 = raster("./Tesis_Imagenes_Satelitales/2022/2022-11-21/LC08_L2SP_010062_20221121_20221129_02_T1_SR_B7.TIF")

# Project Raster
b722p <- projectRaster(b722, crs = sr)
b722pr <- resample(b722p,mdte,method='ngb', filename="")
b722pe = raster::crop(b722pr,e)

#Corrección _Topografica
b722peSGD <- as(b722pe, 'SpatialGridDataFrame')

b722peSGD.topo <- topocorr(b722peSGD, mdt.slopeasp$slope,
                           mdt.slopeasp$aspect, sunelev=61.26979231, sunazimuth=128.32929060)
b7tp22 <- as(b722peSGD.topo, "RasterLayer")
writeRaster(b7tp22, "./My Music/Tesis/Tesis_Imagenes_Satelitales/Corrección_topográfica/2022_B7.TIF")

Fechas
rm(list = ls())
graphics.off()

```

CORRECCIÓN TOPOGRÁFICA

```
library(sf)
```

```

library(terra)
library(raster)
mdt = raster("./My Music/Tesis/Tesis_Imagenes_Satelitales/DEM/DEM.tif")
e = raster::extent(-79.0766,-78.8855,-2.9395, -2.8181)
mdte = raster::crop(mdt,e)
mdteSGD <- as(mdte, 'SpatialGridDataFrame')
plot(mdteSGD)
# require slope and aspect for topographic correction
mdt.slopeasp <- slopeasp(mdteSGD)
str(mdt.slopeasp)

sr <- "+proj=longlat +datum=WGS84 +no_defs"#proyectar

#magen Satelital2022
b622 = raster("./My Music/Tesis/Tesis_Imagenes_Satelitales/2022/2022-11-21/LC08_L2SP_010062_20221121_20221129_02_T1_SR_B6.TIF")

# Project Raster

b622p <- projectRaster(b622, crs = sr)
b622pr <- resample(b622p,mdte,method='ngb', filename="")
b622pe = raster::crop(b622pr,e)

#Corrección_Topografica
b622peSGD <- as(b622pe, 'SpatialGridDataFrame')

b622peSGD.topo <- topocorr(b622peSGD, mdt.slopeasp$slope,
                          mdt.slopeasp$aspect, sunelev=61.26979231, sunazimuth=128.32929060)
b6tp22 <- as(b622peSGD.topo, "RasterLayer")
#writeRaster(b6tp22, "./My Music/Tesis/Tesis_Imagenes_Satelitales/Corrección_topográfica/2022_b6.TIF")

MEDIDAS DE TENDENCIA CENTRAL (MÁXIMO Y MÍNIMO ETC.)

####Bellavista####

#20130504
bellavista20130504 <- raster("Tesis_Imagenes_Satelitales/IMAGENESFINALES/BELLAVISTA/BELLAVISTA_20130504.tif")#llamar modelo parroquia
bellavista20130504
plot(bellavista20130504)

bellavista20130504GV = getValues(bellavista20130504)
bellavista20130504GV
str(bellavista20130504GV)
bellavista20130504GV <- na.omit(bellavista20130504GV)
str(bellavista20130504GV)
bellavista20130504GV <- c(bellavista20130504GV,0,0,0)
str(bellavista20130504GV)
#writeRaster(bellavista20130504, "./Tesis_Imagenes_Satelitales/ImagenesFinalesRstudio/Bellavista20130504.TIF")

```

AUTORIZACION DE PUBLICACION EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Yo, Jonnathan Patricio Reyes Redrovan portador de la cédula de ciudadanía N.º 0106163363. En calidad de autor/a y titular de los derechos patrimoniales del trabajo de titulación “Análisis multitemporal de la concentración del contaminante PM_{2.5} en la zona urbana de la ciudad de Cuenca” de conformidad a lo establecido en el artículo 114 Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, reconozco a favor de la Universidad Católica de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos, Así mismo; autorizo a la Universidad para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el Repositorio Institucional de conformidad a lo dispuesto en el artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 20 de noviembre de 2023



F:

Jonnathan Patricio Reyes Redrovan

0106163363