

## **FACULTAD DE INGENIERÍA**

Carrera de Ingeniería Ambiental

# **"MODELAMIENTO DE LA CALIDAD DE AIRE EN LA CIUDAD DE CAJAMARCA CON TELEDETECCIÓN SATELITAL -2019"**

Tesis para optar el título profesional de

Ingeniera Ambiental

**Autora:**

Marggorie Alexandra Bayona  
Carranza

**Asesor:**

Dr. Sc.  
Irma GERALDA Horna Hernandez

## **DEDICATORIA**

Esta tesis está dedicada a:

A Dios, por ser mi fortaleza día a día y brindarme su amor incondicional, para alcanzar una de mis metas más anheladas.

A mi Madre, Margarita Carranza, porque con sus oraciones, paciencia, sacrificio y amor en todos estos años, hicieron de mí una mejor persona, le debo todos mis logros en este camino, por siempre darme ánimos y nunca dejarme desfallecer antes las dificultades. Es un orgullo y un honor ser su hija.

A mi Padre, José Bayona, por sus principios y cariño en estos años, para convertirme en una mejor persona.

A mis hermanos, Valeria y Joaquin, por su cariño y apoyo incondicional, esperando ser ese reflejo que los impulse a ser mejores cada día. A toda mi familia por sus palabras de aliento, ya que de una u otra forma me acompañan en mis logros.

A todas las personas que siempre están conmigo y algunas que ya no se encuentran en este plano terrenal, que me han apoyado de forma incondicional brindándome su conocimiento, paciencia y cariño, puesto que han aportado un granito de arena para que el estudio se lleve a cabo con éxito.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios por bendecir mi vida, por ser mi guía y así llevar a cabo el presente estudio con éxito, por ser mi soporte en este camino y brindarme las fuerzas necesarias en los momentos de conflicto y desfallecimiento.

Agradezco a mi madre por los sacrificios que ha hecho con la finalidad de poder brindarme la carrera profesional que me apasiona.

Agradezco a los docentes de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Privada del Norte, por compartir su sabiduría y conocimiento durante la formación de mi carrera profesional y personal.

Agradezco a mi asesora de tesis por guiarme en el proceso, a base de su experiencia y sabiduría, por sus constantes indicaciones y orientaciones en el desarrollo de la presente tesis.

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>2</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>3</b>
<b>TABLA DE CONTENIDOS .....</b>	<b>4</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>5</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>6</b>
<b>ÍNDICE DE ANEXOS.....</b>	<b>8</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>9</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>10</b>
1.1. Realidad Problemática.....	10
1.2. Formulación del problema.....	23
1.3. Objetivos.....	23
1.4. Hipótesis .....	24
<b>CAPÍTULO II. METODOLOGÍA.....</b>	<b>25</b>
2.1. Tipo de Investigación.....	25
2.2. Población y muestra (materiales, instrumentos y métodos) .....	25
2.3. Técnicas e Instrumentos de recolección y análisis de datos.....	27
2.4. Procedimiento.....	27
2.5. Aspectos Éticos.....	37
<b>CAPÍTULO III. RESULTADOS.....</b>	<b>39</b>
<b>CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>63</b>
4.1. Discusión .....	63
4.2. Conclusiones.....	68
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>70</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>73</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Métodos de monitoreo para calidad de aire.....	16
Tabla 2. Concentraciones mensuales de Ozono (O <sub>3</sub> ), en la Ciudad de Cajamarca, 2019.....	43
Tabla 3. Concentraciones mensuales de Dióxido de Azufre (SO <sub>2</sub> ), en la Ciudad de Cajamarca, 2019.....	46
Tabla 4. Concentraciones mensuales de Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> ), en la Ciudad de Cajamarca, 2019. ....	49
Tabla 5. Concentraciones mensuales de Monóxido de Carbono (CO), en la Ciudad de Cajamarca, 2019.....	52
Tabla 6. Concentraciones mensuales de Nubosidad, en la Ciudad de Cajamarca, 2019.....	55
Tabla 7. Concentraciones mensuales de Aerosol, en la Ciudad de Cajamarca, 2019.....	58
Tabla 8. Concentraciones mensuales de Formaldehído, en la Ciudad de Cajamarca, 2019.....	61

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sentinel – 5P.....	18
Figura 2. Distrito de Cajamarca.....	28
Figura 3. Portal del Satélite Sentinel -5P, el cual registra la reflectancia de longitudes de onda importantes para medir las concentraciones atmosféricas de O <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , CO, Nubosidad, Aerosol, Metano y Formaldehído. ....	29
Figura 4. Elección de los 7 contaminantes para exportar la imagen satelital, en el enlace señalado.....	29
Figura 5. Se adjunta un Shapefile del distrito de Cajamarca para lograr la ubicación en el mapa. ....	30
Figura 6. Se utiliza el lenguaje Python para incorporar el shapefile del distrito de Cajamarca a la base de información extraída del Satélite Sentinel - 5P, Imagen Satelital de Google Earth Engine. ....	30
Figura 7. Shapefile incorporado en la base de información extraída del Satélite Sentinel - 5P, Imagen Satelital de Google Earth Engine.....	31
Figura 8. Creación de un polígono para delimitar el área de estudio. ....	32
Figura 9. Código Python para recortar la imagen satelital con la información extraída del Satélite Sentinel - 5P en el área de estudio delimitada. ....	32
Figura 10. Recorte de la imagen satelital con la información extraída del Satélite Sentinel - 5P en el área de estudio delimitada, así mismo la descarga de la imagen satelital.....	34
Figura 11. Imagen satelital proyectada en ArcGis 10.8.....	35
Figura 12. Recorte de la imagen Satelital. ....	36
Figura 13. Proceso de Interpolación, escala de colores. ....	36
Figura 14. Modelamiento del mapa según las concentraciones atmosféricas de O <sub>3</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , CO, Nubosidad, Aerosol y Formaldehído.....	37
Figura 15. Diagrama de Flujo del proceso metodológico del proyecto. Elaboración propia. ...	38
Figura 16. Modelamiento de la concentración de Ozono (O <sub>3</sub> ), en la Ciudad de Cajamarca, de enero a diciembre del 2019.....	42

Figura 17. Variación en las concentraciones mensuales de Ozono ( $O_3$ ), de la Ciudad de Cajamarca, 2019. ....	44
Figura 18. Modelamiento de la concentración de Dióxido de Azufre ( $SO_2$ ), en la Ciudad de Cajamarca, de enero a diciembre del 2019. ....	45
Figura 19. Variación en las concentraciones mensuales de Dióxido de Azufre ( $SO_2$ ), de la Ciudad de Cajamarca, 2019.....	47
Figura 20. Modelamiento de la concentración de Dióxido de Nitrógeno ( $NO_2$ ), en la Ciudad de Cajamarca, de enero a diciembre del 2019. ....	48
Figura 21. Variación en las concentraciones mensuales de Dióxido de Azufre ( $SO_2$ ), de la Ciudad de Cajamarca, 2019.....	50
Figura 22. Modelamiento de la concentración de Monóxido de Carbono (CO), en la Ciudad de Cajamarca, de enero a diciembre del 2019. ....	51
Figura 23. Variación en las concentraciones mensuales de Monóxido de Carbono (CO), de la Ciudad de Cajamarca, 2019. ....	53
Figura 24. Modelamiento de la concentración de Nubosidad, en la Ciudad de Cajamarca, de enero a diciembre del 2019.....	54
Figura 25. Variación en las concentraciones mensuales de Nubosidad, de la Ciudad de Cajamarca, 2019. ....	56
Figura 26. Modelamiento de la concentración de Aerosol, en la Ciudad de Cajamarca, de enero a diciembre del 2019.....	57
Figura 27. Variación en las concentraciones mensuales de Aerosol, de la Ciudad de Cajamarca, 2019.....	59
Figura 28. Modelamiento de la concentración de Formaldehído, en la Ciudad de Cajamarca, de enero a diciembre del 2019.....	60
Figura 29. Variación en las concentraciones mensuales de Formaldehído, de la Ciudad de Cajamarca, 2019. ....	62

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Mapa de Ubicación. ....	73
Anexo 2: Modelamiento de la concentración anual de Ozono, en la Ciudad de Cajamarca – 2019. .....	74
Anexo 3: Modelamiento de la concentración anual de Dióxido de Azufre, en la Ciudad de Cajamarca – 2019. ....	75
Anexo 4: Modelamiento de la concentración anual de Dióxido de Nitrógeno, en la Ciudad de Cajamarca – 2019. ....	76
Anexo 5: Modelamiento de la concentración anual de Monóxido de Carbono, en la Ciudad de Cajamarca – 2019. ....	77
Anexo 6: Modelamiento de la concentración anual de la Nubosidad, en la Ciudad de Cajamarca – 2019.....	78
Anexo 7: Modelamiento de la concentración anual de Aerosol, en la Ciudad de Cajamarca – 2019.....	79
Anexo 8: Modelamiento de la concentración anual de Formaldehído, en la Ciudad de Cajamarca – 2019.....	80

## RESUMEN

En la presente tesis se realizó el modelamiento de la calidad de aire en la ciudad de Cajamarca con teledetección Satelital - 2019. Se utilizó el Sentinel - 5P puesto que este instrumento recopila datos que ayudan a evaluar la calidad del aire por medio de TROPOMI que registra la reflectancia de longitudes de onda importantes que miden las concentraciones de los contaminantes. El SIG que se empleó fue ArcGis, el cual permitió visualizar los modelamientos para cada contaminante. Se procedió con la estadística descriptiva, mediante Microsoft Excel, evidenciando que las mayores concentraciones de NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y Nubosidad se dieron en el mes de octubre, para Formaldehído, Aerosol y O<sub>3</sub> se dieron en el mes de agosto y por último de CO en el mes de marzo del 2019. Se concluyó que con los datos obtenidos se puede incluir un nuevo método de monitoreo para evaluar la calidad de aire, siendo de mucha ayuda la teledetección Satelital y estaciones de monitoreo como referente, puesto que cada zona realiza diferentes actividades. Además, evidenciando la falta de estaciones de monitoreo terrestre para la ciudad de Cajamarca, así como normativa y estándares aplicados a este método.

**Palabras clave:** Modelamiento, Calidad de aire, Sentinel - 5P, Variación, ArcGis.

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Realidad Problemática.

La Calidad del aire es un problema ambiental a nivel mundial, esto se debe a la contaminación del aire ocasionada en su mayoría por el crecimiento del parque automotor, actividades industriales y comerciales. Así mismo, las condiciones geográficas meteorológicas de dicha ciudad.

En Latinoamérica, el Perú es considerado el país con peores índices de calidad de aire, ya que ocupa el puesto 21 en el reporte mundial de calidad de aire. Esto indica que puede causar daños a la salud de la población más vulnerable, tal es así como enfermedades respiratorias.

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la exposición a diversos contaminantes que están presentes en el aire puede generar efectos en la salud de la población, entre los contaminantes más comunes se encuentran: Material particulado (MP), Ozono (O<sub>3</sub>), Monóxido de Carbono (CO), Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>).

La ciudad de Cajamarca posee un motor industrial y comercial de gran importancia para la economía del país, este crecimiento industrial no solo trae beneficios económicos para la ciudad, sino también efectos nocivos tal como la contaminación, agravando así los índices de calidad de aire.

En dicha ciudad, en el año 2012 el parque automotor evidenció un crecimiento, así mismo la quema desmesurada de fósiles, generando emisiones de diversos contaminantes al aire (Araujo Sánchez, 2016).

Las autoridades locales no cuentan con un plan ni el presupuesto adecuado para la implementación de estaciones de monitoreo de la calidad de aire, siendo este un obstáculo para frenar la contaminación ambiental de manera adecuada e impidiendo mejorar la calidad de vida de la población.

En el año 2017, se lanzó al espacio el primer satélite especializado en el monitoreo de la composición atmosférica, Copernicus Sentinel - 5P (SP5) el cual fue diseñado para monitorear los diferentes gases presentes en la estratósfera y la troposfera, siendo este el resultado de una estrecha colaboración entre la European Space Agency (ESA), la comisión europea, la oficina espacial de los países bajos, la industria, los usuarios de datos y los científicos, a bordo de Copernicus Sentinel - 5P se encuentra TROPOMI siendo este un instrumento de monitoreo troposférico que puede evolucionar la forma en que se monitorea los contaminantes que se encuentran en el aire desde el espacio, gracias a la resolución espacial que posee (Ialongo, Virta, Eskes, Hovila y Douros, 2020). Dicho sensor mide las concentraciones de; monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), formaldehídos, parámetros de aerosoles, así como las características de las nubes (Veefkind, Kleippol y Ludewig, 2017).

Para lograr visualizar la información generada por TROPOMI en modelamientos se emplean Sistemas de Información Geográfica (SIG), que son de gran utilidad en diversos casos de estudio. Para lo cual se empleó el software ArcGis, siendo de gran utilidad para el desarrollo de los modelamientos. La correcta implementación de estos modelos permite evaluar el impacto que genera cada uno de los contaminantes sobre la calidad de aire en la ciudad de Cajamarca.

Por lo expuesto, en el presente estudio se buscó realizar el modelamiento de la calidad de aire de los siguientes contaminantes atmosféricos O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, Nubosidad, Aerosol y Formaldehído en el periodo de enero a diciembre de 2019, en la ciudad de Cajamarca utilizando las imágenes satelitales proporcionadas por el Satélite Copernicus Sentinel – 5P en el software ArcGis 10.8.

Los antecedentes que sirvieron para entender los principales aspectos del presente estudio son los siguientes:

### **Antecedentes Internacionales**

Ialongo et al. (2020) menciona que:

Este es uno de los primeros trabajos en los que las recuperaciones de TROPOMI se validan con observaciones terrestres y los resultados proporcionan una evaluación temprana de su aplicabilidad para monitorear los niveles de contaminación en sitios urbanos. En general, las recuperaciones de TROPOMI son valiosas para complementar los datos de calidad del aire basados en tierra (disponibles con alta resolución temporal) para describir la variabilidad espacio - temporal del NO<sub>2</sub>, incluso en una ciudad relativamente pequeña como Helsinki. (p.1)

Ortega (2020) plantea que, el uso de las imágenes del satélite Sentinel - 5P para examinar la relación entre los gases de la atmósfera y la inmovilización social de las 5 ciudades de Sudamérica, mostraron la disminución con asociaciones significativas negativas para los gases de NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> y CO siendo excepción de la ciudad de Santiago que mostró un aumento. Mientras,

para el gas de  $\text{SO}_2$ , los datos trabajados fueron insuficientes para marcar alguna tendencia de disminución y/o aumento.

Arboleda y Vásquez (2021) realizaron un análisis descriptivo para comprobar la similitud en el comportamiento de datos de las mediciones espaciales y las de tierra, en la que se determinó que, si tienen una similitud en su comportamiento, evidenciando una disminución en las concentraciones de  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$  y  $\text{O}_3$  durante el periodo de cuarentena obligatoria provocado por el Covid-19 y la emergencia sanitaria en Ecuador. Los resultados obtenidos fueron modelados en mapas espacio temporales donde se evidencia las áreas con mayor concentración en el Distrito Metropolitano de Quito, desarrollando la aplicación web que muestra mosaicos de las observaciones proporcionadas por el sensor TROPOMI a bordo del Sentinel 5P, en el cual se podrá seleccionar la fecha a voluntad, el contaminante y la provincia de Ecuador donde desee ver el comportamiento de los contaminantes analizados.

Guerrero (2021) realizó un análisis comparativo de la variación de la calidad del aire en Ecuador, utilizando dos satélites antes, durante y después del confinamiento por COVID-19, el cual demostró las diferencias dentro de la evolución espacio - temporal de  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  y  $\text{O}_3$ . Siendo las recuperaciones del satélite Sentinel -5P valiosos para completar los datos para evaluar la calidad del aire en tierra, para describir la variabilidad espacio - temporal de diferentes contaminantes.

(Moscoso, Astudillo y Vásquez, 2015) da a conocer que la calidad de aire en la ciudad de Cuenca presenta problemas de contaminación, por lo cual se realizó un trabajo sobre la dispersión y transporte de contaminantes con modelos de dispersión DISPER5.2 y WRF/Chem, analizando la calidad de modelación, grado de aproximación y limitantes. El SIG utilizado fue

ArcGis, el cual permitió visualizar los mapas generados en los modelos. DISPER5.2 presento una modelación de baja calidad por su limitada resolución a diferencia de WRF/ Chem, el cual estableció relación entre los datos geográficos y meteorológicos del área de estudio con la química de los contaminantes, obteniendo resultados con una alta resolución.

### **Antecedentes nacionales**

Ortega (2020) determino que, el uso de imágenes satelitales Sentinel - 5P para examinar las asociaciones entre los gases de la atmósfera y la inmovilización social establecida en cada país, demostrando que en la ciudad de lima hubo una disminución del 39.55% para el gas de NO<sub>2</sub>, 0.47% para el gas de O<sub>3</sub> y de 6.69% para el gas de CO. Concluyendo que la invalidación social influyo positivamente en la reducción de dichos gases contaminantes en el aire y como consecuencia se obtuvo la mejora de la calidad de aire en la ciudad de Lima.

SENAMHI. (2020) demostró que los datos mostrados por el satélite Sentinel - 5P y el Modelo (CAM5), indicaron disminuciones para el gas NO<sub>2</sub> de entre hasta un 80% y así mismo para PM 2.5 hasta un 60% sobre el área metropolitana Lima y Callao en comparación al mes de abril del año 2019, demostrando que el confinamiento social influyo positivamente en la reducción de dicho gas.

Las bases teóricas que sirvieron para entender los aspectos principales del fenómeno de estudio son los siguientes:

## **Medio Ambiente**

Tena y Hernández (2014) mencionan que:

Entendemos por “medio ambiente” toda la red de interacciones geológicas y biológicas que determinan la relación entre la vida y el planeta Tierra. Pero es además el conjunto de relaciones fundamentales que existen entre el mundo material o biofísico (atmósfera, litosfera, hidrosfera, biosfera) y el mundo sociopolítico. (p. 9)

## **Contaminación Atmosférica**

La contaminación atmosférica es un proceso en el cual se evidencia la presencia de sustancias en cantidades que impliquen incomodidad o riesgo para la salud de la población humana, de vida animal o vegetal, los procesos industriales son los principales mecanismos que involucra la combustión generando sustancias nocivas (Arenas, 2017).

## **Calidad de Aire**

La calidad del aire en el Perú se establece según el Índice Nacional de Calidad de Aire, este nos permite conocer el estado en el que se encuentra al instante, se conoce a través de mediciones con equipos especializados, puesto que hay presencia de factores que afectan la calidad del aire (MINAM, 2016).

## **Métodos de Monitoreo**

Según la DIGESA (2005) menciona que:

De acuerdo a la Guía de la Calidad del Aire de la OMS, los métodos de monitoreo se pueden dividir en cuatro tipos genéricos principales con diferentes costos y niveles de desempeño e incluyen a los muestreadores pasivos, muestreadores activos, analizadores automáticos y sensores remotos. (p.13)

**Tabla 1**

*Métodos de monitoreo para calidad de aire.*

<b>Métodos de Monitoreo</b>	<b>Descripción</b>
<b>Muestreadores Pasivos</b>	Ofrecen un método simple y eficaz en función de los costos para realizar el sondeo de la calidad del aire en un área determinada.
<b>Muestreadores Activos</b>	Las muestras de contaminantes se recolectan por medios físicos o químicos para su posterior análisis en el laboratorio.
<b>Analizadores Automáticos</b>	Pueden proporcionar mediciones de alta resolución (generalmente en promedios horarios o mejores) en un único punto para varios contaminantes criterio (SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , CO, MP), así como para otros contaminantes importantes como los COV.
<b>Sensores Remotos</b>	Son instrumentos desarrollados recientemente que usan técnicas espectroscópicas de larga trayectoria para medir las concentraciones de varios contaminantes en tiempo real.

*Nota:* DIGESA (2015. p. 13)

### **Estándares de Calidad Ambiental para Aire**

Tomando en consideración las nuevas evidencias halladas por la Organización Mundial de la Salud, resulta necesario aprobar nuevos Estándares de Calidad Ambiental de Aire para Dióxido de Azufre, los mismos que entrarán en vigencia a partir del primero de enero del 2009, así como

establecer Estándares Ambientales de Calidad de Aire para Benceno, Hidrocarburos Totales, Material Particulado con diámetro menor a 2.5 micras e Hidrógeno Sulfurado (MINAM, 2008).

### **¿Qué es la Teledetección?**

La teledetección es una técnica que permite realizar la medición y observación a distancia de objetos sin que exista contacto material entre los objetos observados en tiempo real, permitiendo a través de satélites o radares el escaneo o grabación del objeto al cual se quiere observar (Martínez y Martín, 2010).

### **Teledetección Pasiva por Satélites**

La teledetección pasiva se encarga de detectar la radiación que emite o refleja el objeto de estudio, las ondas electromagnéticas procedentes de fuentes de energía natural tales como el sol y la temperatura que emiten los cuerpos son captados por los sensores, registrando así esta radiación y a partir de eso se determina la temperatura y la intensidad de radiación en el campo espectral de microondas (Arboleda y Vásquez, 2021).

### **Sentinel-5P**

Este satélite fue lanzado el 13 de octubre 2017, opera en una órbita polar, heliosíncrona al sol a una altitud de 824 km, su ciclo de órbita es de 16 días (14 órbitas por día, 227 órbitas por ciclo). Cuenta con un instrumento, el espectro de imágenes de visión nadie multiespectral de detección pasiva TROPOMI, siendo su misión el monitoreo de gases traza, distribución de aerosoles y nubes que afectan a la calidad del aire y el clima (Guerrero, 2021).

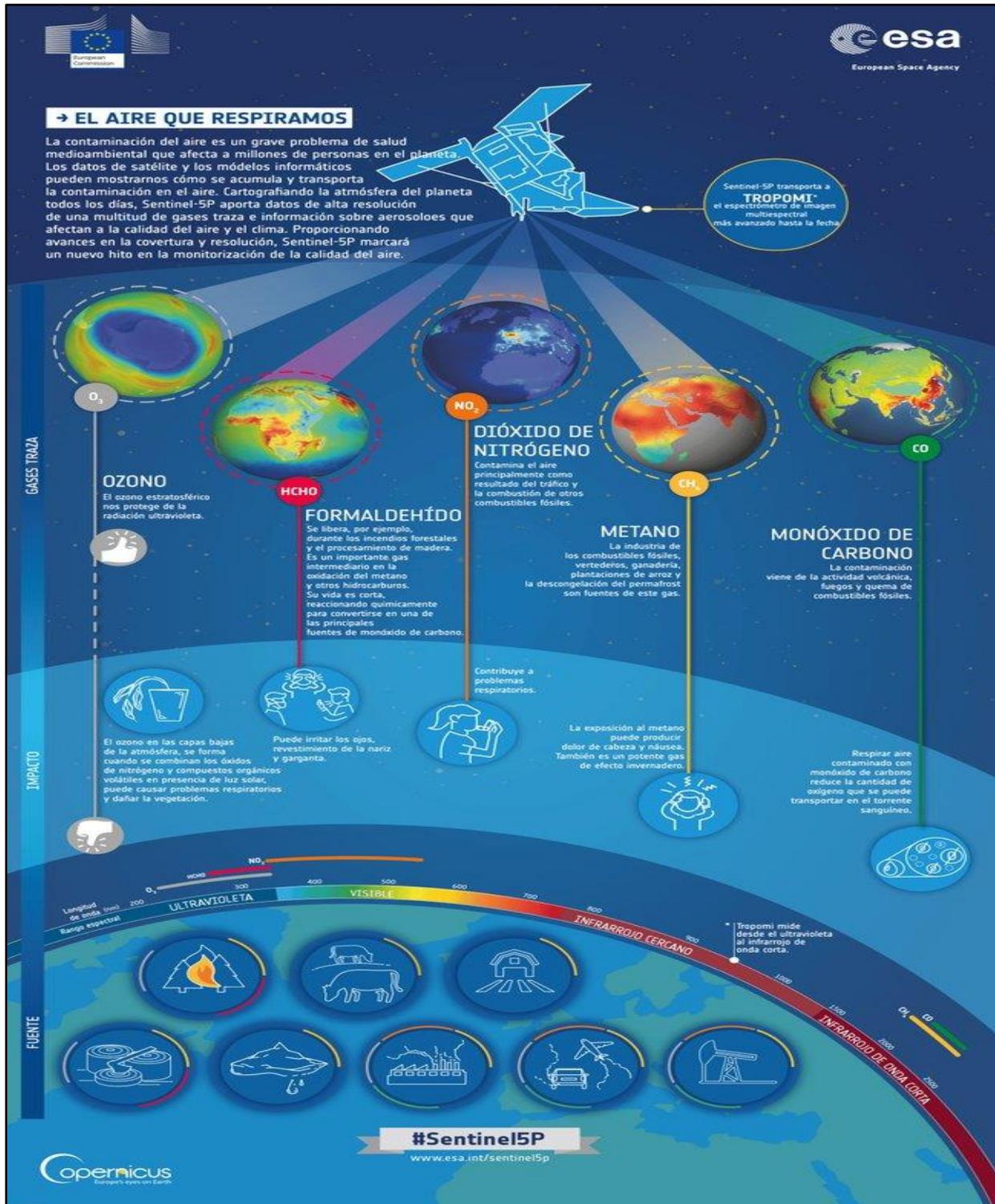


Figura 1. Sentinel – 5P

## **TROPOMI**

El instrumento de Monitoreo Troposférico es un espectrómetro de imágenes de visión nadir con bandas espectrales en el ultravioleta (UV), UV - visible (UVIS), Infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de longitud de onda corta (SWIR). Este opera en una configuración de barrido de empuje, con un ancho de ~2600 km en la superficie de la tierra. El tamaño de píxel típico (cerca del nadir) será de  $7 \times 3.5 \text{ km}^2$  para todas las bandas espectrales, con la excepción de la banda UV1 ( $7 \times 28 \text{ km}^2$ ) y las bandas SWIR ( $7 \times 7 \text{ km}^2$ ) (ESA, 2021).

## **Procesamiento de imágenes con Python**

Python es un programa de lenguaje multiparadigma, convirtiéndose en un lenguaje muy adoptado, debido a su simpleza y practicidad, el cual permite integrar diversos proyectos de investigación, ya que los resultados son captados por medio de imágenes, siendo necesario el uso de comandos de Python (Ortega, 2018).

## **Monóxido de carbono (CO)**

El monóxido de carbono (CO), es un gas venenoso inodoro e incoloro, proveniente de la combustión incompleta de compuestos de carbono, formándose por la oxidación del metano, este es producido por la descomposición de materia orgánica. Algunas de las principales fuentes de contaminación por CO es la quema incompleta de combustibles como la gasolina e incendios forestales. Una forma de reducir la contaminación por este gas es que los automóviles sean afinados para asegurar la mezcla del oxígeno con el combustible (Rudas, 2013).

### **Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)**

El dióxido de azufre es un gas corrosivo e incoloro, no inflamable, con un olor penetrante que puede generar irritación en los ojos, la fuente natural de este gas en la atmósfera la generan las erupciones volcánicas, siendo un gas que se origina sobre todo durante la combustión de carburantes fósiles que contienen azufre (petróleo, combustibles sólidos), usados en procesos industriales de alta temperatura y de generación eléctrica (Sotomayor y Marín, 2010).

### **Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>)**

El dióxido de nitrógeno es un gas tóxico, corrosivo y altamente oxidante, a temperatura normal es muy volátil, siendo un agente oxidante muy fuerte actuando como comburente frente a materiales combustibles. La mayor fuente de emisiones de óxidos de nitrógeno es el uso de combustibles fósiles por fuentes fijas y móviles, también se producen durante la fabricación de ácido nítrico, uso de explosivos, gas licuado de petróleo y en procesos de soldadura. Este puede producir efectos nocivos en la salud como en la función pulmonar y problemas respiratorios (Alva, 2019).

### **Ozono (O<sub>3</sub>)**

El ozono está presente en la troposfera y en la estratosfera, siendo en la estratosfera la mayor concentración de O<sub>3</sub>, actuando como barrera para proteger superficie de la tierra de la radiación – UV, permitiendo que solo una pequeña parte llegue a la superficie, sin embargo, el ozono que se encuentra en la troposfera es perjudicial para la salud de los seres humanos, animales y así mismo a la vegetación. El ozono que se encuentra en la troposfera se forma a partir de reacciones fotoquímicas complejas con intensa luz solar entre contaminantes primarios como NO y NO<sub>2</sub> y

compuestos orgánicos volátiles. Estos pueden causar problemas respiratorios y en los ojos (Soledad, 2020).

### **Formaldehídos**

Según OSMAN (2011) menciona que, el formaldehído es un compuesto químico de alta prioridad, que da un nivel de no-efecto estimado en  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  como una media de 30 minutos. Un valor guía debería ser lo más bajo como sea razonablemente posible.

- Restringir las emisiones de formaldehído de productos de construcción, mobiliario y productos químicos de uso doméstico y en oficinas.

Las recomendaciones de la Agencia de protección ambiental estadounidense son:

- Usar aire acondicionado y deshumidificadores para mantener una temperatura moderada y reducir los niveles de humedad.
- Incrementar la ventilación, particularmente después de introducir nuevas fuentes de formaldehído en el hogar.
- La tasa de liberación de formaldehído se acelera por el calor y puede también depender en cierto grado del nivel de humedad. Por ello, la utilización de deshumidificadores y aire acondicionado para controlar la humedad y mantener una temperatura moderada puede ayudar a reducir las emisiones de formaldehído. No olvidar, drenar y limpiar las bandejas de los deshumidificadores frecuentemente para que no se conviertan en campos de cultivo de microorganismos.
- Incrementar las tasas de ventilación en viviendas también puede ayudar a reducir los niveles de formaldehído en el interior.

- Incrementar la ventilación cuando se utilicen productos que emitan COVs. Tener en cuenta cualquier precaución recomendada en las etiquetas y no almacenar contenedores de pinturas que no se usen o materiales similares en el interior.
- Al ser uno de los pocos contaminantes del aire interior que puede ser fácilmente medido, puede identificarse la fuente. Si es posible, elimínese, si no, puede ser sellada usando un sellador.

### **Parámetros de aerosoles**

Entendemos como aerosol, a la mezcla heterogénea de partículas sólidas o líquidas en un medio gaseoso, afectando estas a la calidad del aire, causando daños en la salud humana y en el medio ambiente, por lo cual afecta negativamente a los ecosistemas, ya que estas se mantienen en suspensión en un tiempo aproximado de al menos 1 hora. Estas pueden ser de origen primario o secundario, los primarios son formados por la emisión directa de las partículas desde su fuente y los secundarios se forman a partir de reacciones atmosféricas a partir de precursores gaseosos, estos pueden producirse por actividades naturales o antropogénicas (Marino, 2011)

### **Características de las nubes**

García y García (s. f.) menciona que:

Las nubes son signos que delatan, de forma visible, el carácter estable o inestable que presenta la atmósfera en un momento determinado a la altura en que ellas se encuentran. Las nubes «hablan» para el que sabe interpretarlas. Proporcionan una clara referencia de la calma o del oleaje atmosférico (anticiclones y borrascas) y son un fiel reflejo del estado del cielo asociado al carácter del tiempo meteorológico, viento, tormenta, lluvia, etc. (p. 2)

## **Sistema de información geográfica ArcGis**

ArcGis es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica, el cual posee una interfaz gráfica de usuario, facilitando el análisis de datos espaciales y tabulares en forma de mapas, tablas y gráficos. Esta se compone de tres aplicaciones que están incluidas en ArcInfo, ArcEditor y ArcView, las cuales son ArcMap, ArcCatalog y ArcToolbox (Puerta y Bravo, 2011).

### **1.2. Formulación del problema.**

¿Es posible realizar el modelamiento de la concentración de los siguientes contaminantes atmosféricos O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, Nubosidad, Aerosol y Formaldehído utilizando las imágenes satelitales proporcionadas por el Satélite Copernicus Sentinel – 5P en el software ArcGis (10.8) en la Ciudad de Cajamarca durante el año 2019?

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Modelar la concentración de los siguientes contaminantes atmosféricos O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, Nubosidad, Aerosol y Formaldehído, empleando las imágenes satelitales proporcionadas por el Satélite Copernicus Sentinel – 5P en el software ArcGis 10.8 en la Ciudad de Cajamarca durante el año 2019.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

Recopilar las imágenes satelitales a través del Satélite Copernicus Sentinel - 5P de los siguientes contaminantes atmosféricos O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, Nubosidad, Aerosol y Formaldehído presentes en la Ciudad de Cajamarca durante los meses de enero a diciembre de 2019.

Realizar el modelamiento de la Ciudad de Cajamarca con las imágenes satelitales obtenidas del satélite Copernicus Sentinel - 5P de los siguientes contaminantes atmosféricos O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>,

CO, Nubosidad, Aerosol y Formaldehído utilizando el software ArcGis 10.8, durante los meses de enero a diciembre de 2019.

#### **1.4. Hipótesis**

##### **1.4.1. Hipótesis general**

Basándonos en el modelamiento realizado en ArcGis 10.8 se demuestra la presencia de los siguientes contaminantes atmosféricos O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, Nubosidad, Aerosol y Formaldehído entre los meses de enero a diciembre del 2019.

##### **1.4.2. Hipótesis específicas**

Se logró realizar un modelamiento característico con ArcGis 10.8 y se pudo demostrar que hubo presencia de los siguientes contaminantes atmosféricos O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, Nubosidad, Aerosol y Formaldehído en la Ciudad de Cajamarca entre los meses de enero a diciembre del 2019.

Mediante la elaboración de los mapas para determinar la concentración de los siguientes contaminantes atmosféricos O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, Nubosidad, Aerosol y Formaldehído con ArcGis 10.8, se demuestra que se puede realizar de manera satisfactoria un modelamiento de las concentraciones de dichos contaminantes con los datos obtenidos del Satélite Copernicus Sentinel - 5P.

## CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

### 2.1. Tipo de Investigación.

El tipo de investigación es de alcance descriptivo y retrospectivo.

Según Dagnino (2014) menciona que, los datos se refieren a hechos que ya ocurrieron. Estos no permiten estudiar una relación temporal entre causa y efecto, por lo que no sirven para indicar causalidad. Se puede decir que este tipo de estudios buscan las causas a partir de un efecto que ya se presentó, parten de un efecto y regresan a buscar la causa.

Hernandez et al. (2014) refiere que “los estudios descriptivos buscan especificar propiedades y características importantes de cualquier fenómeno que se analice. Describe tendencias de un grupo o población. Es decir, únicamente pretenden medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o las variables a las que se refieren.” (p. 92).

### 2.2. Población y muestra (materiales, instrumentos y métodos)

#### 2.2.1. Población

La población de estudio será en un área 382.74 km<sup>2</sup>, área que corresponde al Distrito de Cajamarca.

#### 2.2.2. Muestra

Conformada por las imágenes satelitales obtenidas del Sentinel - 5P que corresponden al área del Distrito de Cajamarca durante el año 2019

#### 2.2.3. Materiales

- Libreta de apuntes.
- Lapicero.
- USB.

- Laptop Core 7 Asus.

#### 2.2.4. Instrumentos

- Satélite Copernicus Sentinel-5P

El instrumento utilizado por el Satélite Copernicus Sentinel – 5P para el monitoreo de los siguientes contaminantes O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, Nubosidad, Aerosol y Formaldehído es TROPOMI, este es un espectrómetro de imágenes de visión nadir transportado en el espacio que cubre bandas de longitud de onda entre el ultravioleta y el infrarrojo de onda corta. Opera en una configuración de barrido de empuje (sin escaneo), con un ancho de barrido de ~2600 km en la superficie de la Tierra. El instrumento Sentinel-5 / UVNS es un espectrómetro de imágenes pushbroom de alta resolución que funciona en siete bandas espectrales diferentes: ultravioleta - UV-1 (270-300 nm) y UV-2 (300-370 nm) -, visible (370-500 nm), infrarrojo cercano: NIR-1 (685-710 nm), NIR-2 (755-773 nm), SWIR-1 (1590-1675 nm) y SWIR-3 (2305-2385 nm). El tamaño de píxel típico (cerca del nadir) será de 7x3,5 km<sup>2</sup> para todas las bandas espectrales, con la excepción de la banda UV1 (7x28 km<sup>2</sup>) y las bandas SWIR (7x7 km<sup>2</sup>).

- Software ArcGis 10.8

Proporciona todo lo que necesita para administrar y obtener respuestas de imágenes y datos teledetectados. Incluye herramientas de generación de imágenes y flujos de trabajo para visualización y análisis, y acceso a la colección de imágenes más amplia del mundo.

- Google Earth Engine.
- Python.

#### 2.2.5. Métodos

Se utilizó el método cuantitativo:

Hernandez et al. (2014) menciona que, el enfoque cuantitativo es un conjunto de procesos que utilizan la recolección de información para comprobar las hipótesis en base de los análisis de las mediciones utilizando métodos estadísticos.

### 2.3. Técnicas e Instrumentos de recolección y análisis de datos

#### 2.3.1. Técnicas

- Método de Teledetección Satelital Pasiva.
- Método de análisis estadístico de datos.
- Lenguaje de programación Python.

#### 2.3.2. Instrumentos

- Imágenes Satelitales del Satélite Copernicus Sentinel - 5P.
- Programas para el procesamiento software ArcGis 10.8
- Apuntes y bloc de notas.

### 2.4. Procedimiento

En la presente investigación se empleó el uso de imágenes satelitales del Satélite Copernicus Sentinel - 5P para obtener las imágenes satelitales de las concentraciones de los siguientes contaminantes atmosféricos O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, Nubosidad, Aerosol y Formaldehído, las cuales fueron importadas en el software ArcGis 10.8, en donde se pudo obtener los valores mensuales de todo el año 2019, para este estudio se requirió realizar una variación mensual.

2.4.1. Ubicación Geográfica

La Ciudad de Cajamarca tiene una extensión de 382.74 km<sup>2</sup>.

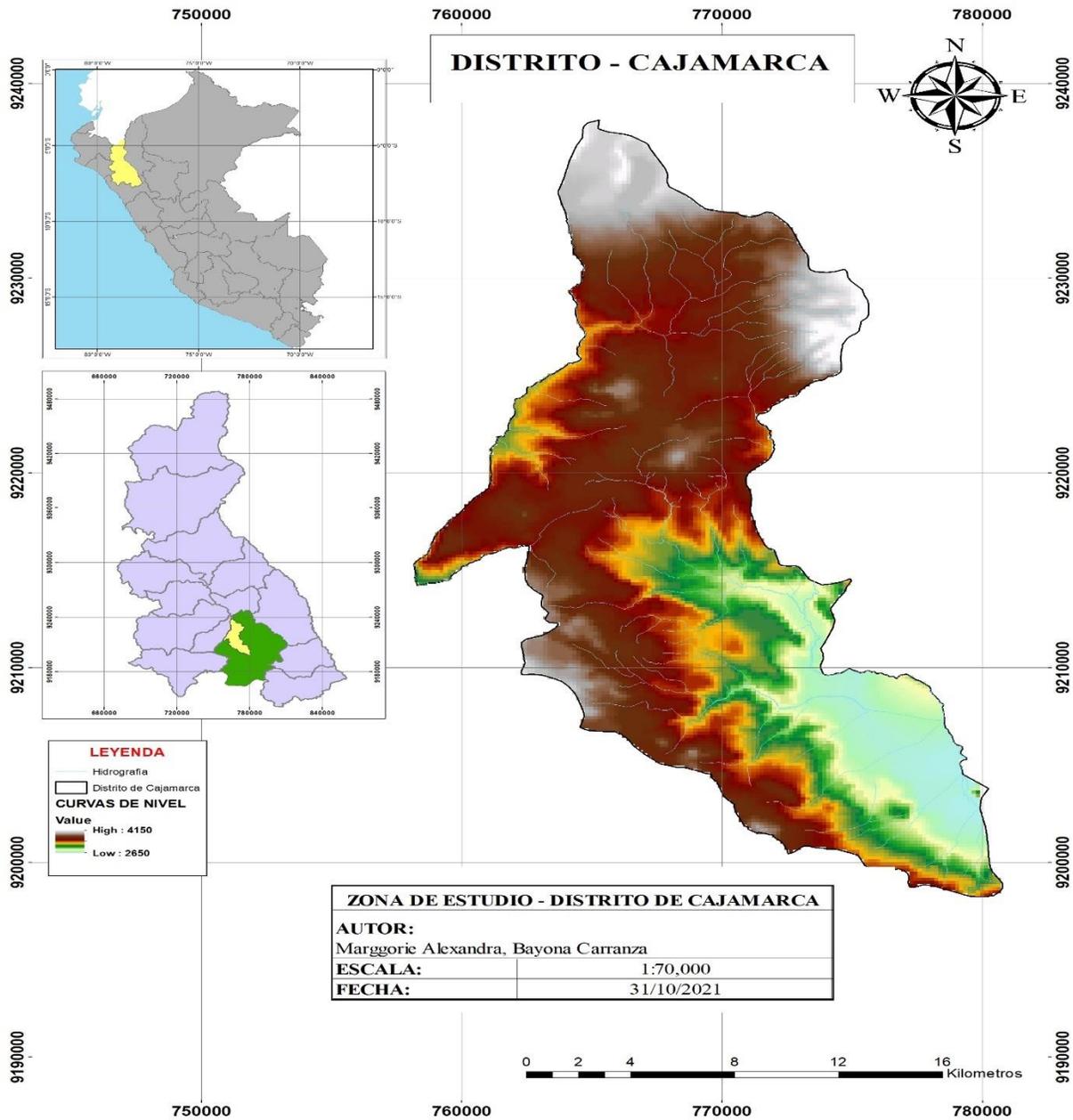


Figura 2. Distrito de Cajamarca. Elaboración Propia

### 2.4.2. Descarga de Datos

Se empleó el Satélite Sentinel – 5P, el cual sirvió para poder descargar las imágenes satelitales, los cuales nos muestran como se acumula y transporta la contaminación en el aire.

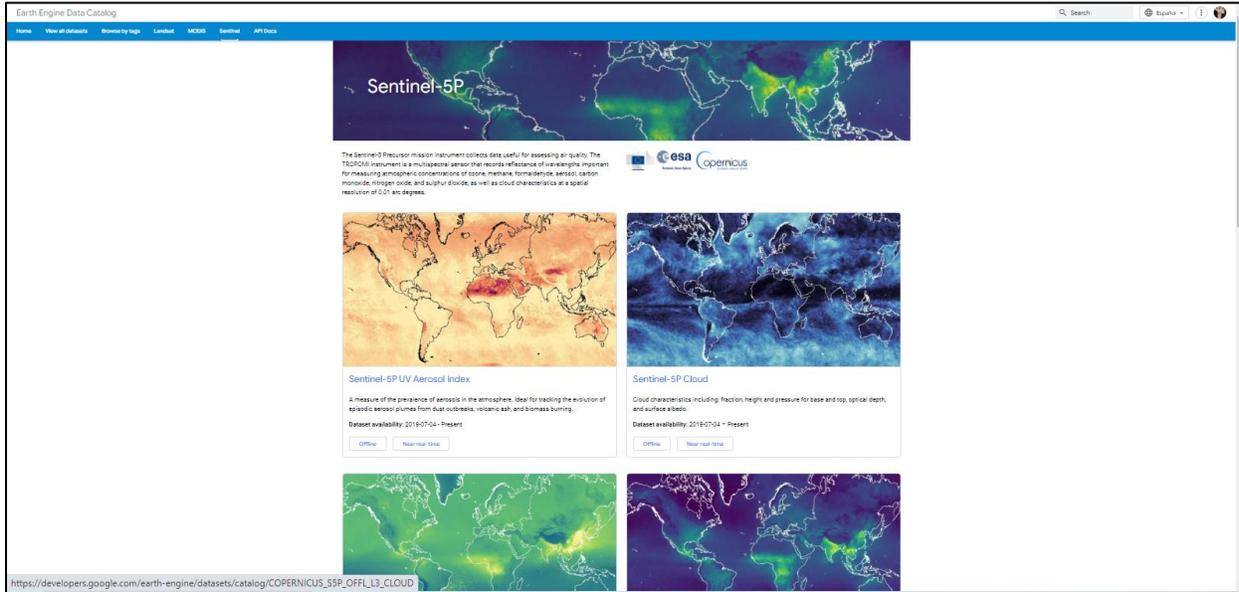


Figura 3. Portal del Satélite Sentinel -5P, el cual registra la reflectancia de longitudes de onda importantes para medir las concentraciones atmosféricas de O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, Nubosidad, Aerosol, Metano y Formaldehído.

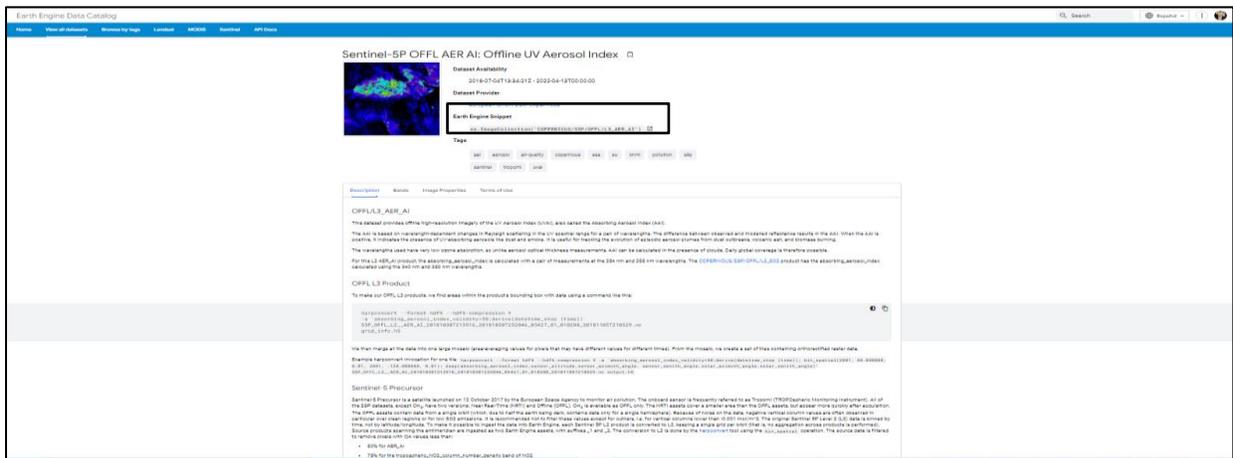


Figura 4. Elección de los 7 contaminantes para exportar la imagen satelital, en el enlace señalado.

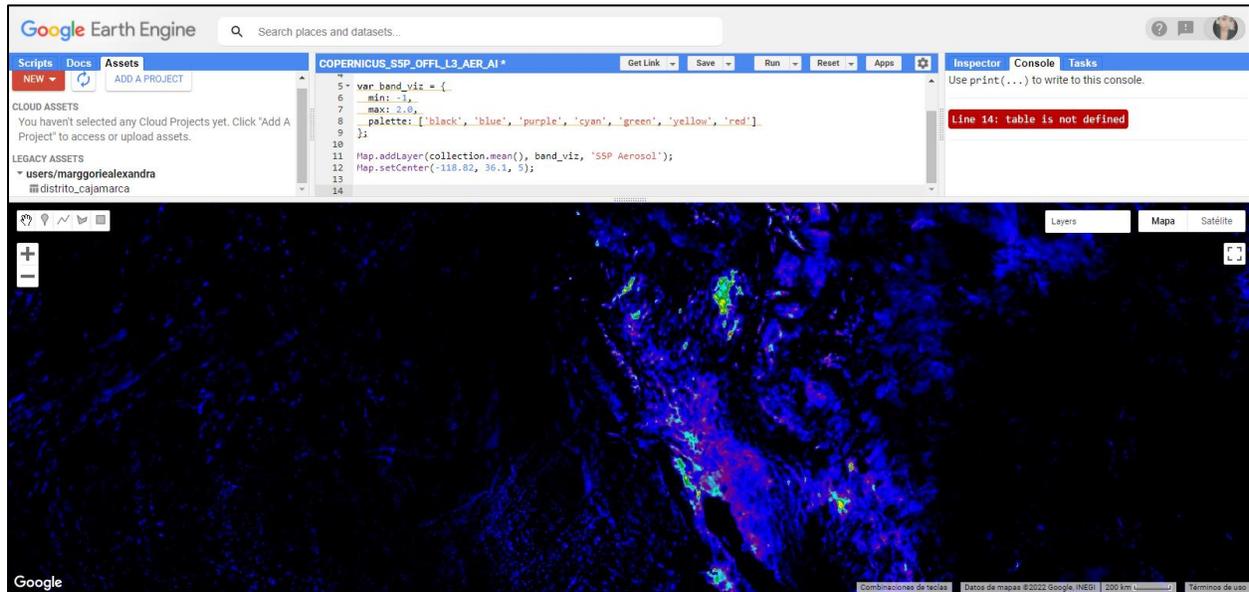


Figura 5. Se adjunta un Shapefile del distrito de Cajamarca para lograr la ubicación en el mapa.

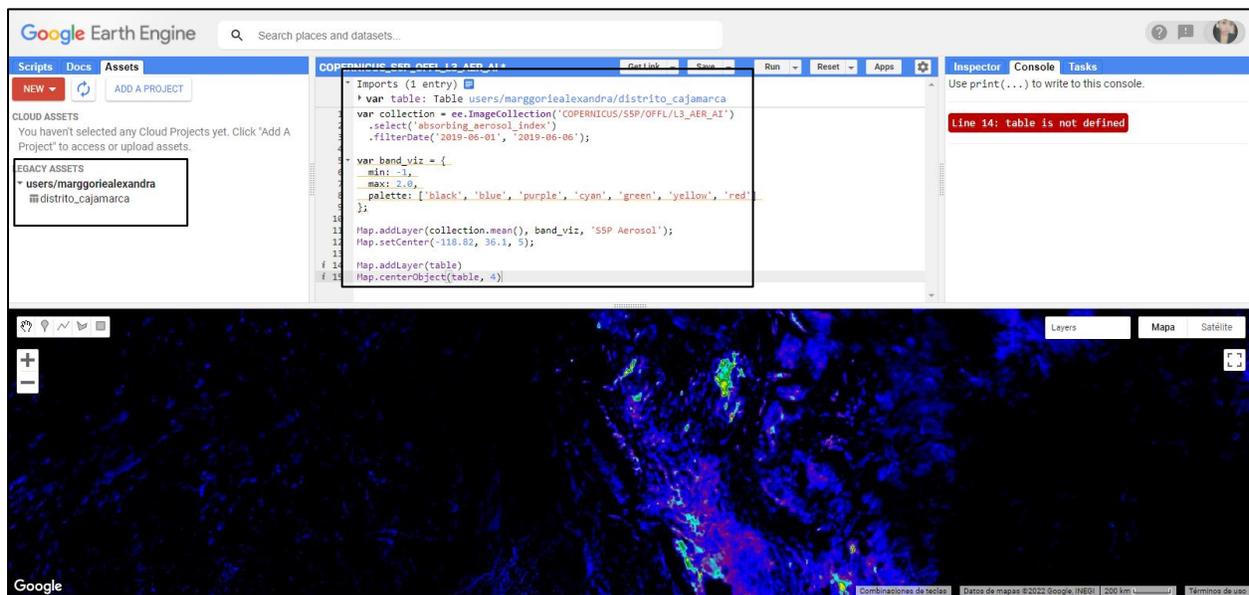


Figura 6. Se utiliza el lenguaje Python para incorporar el Shapefile del distrito de Cajamarca a la base de información extraída del Satélite Sentinel - 5P, Imagen Satelital de Google Earth Engine.

```

var collection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_AER_AI')
  .select('absorbing_aerosol_index')
  .filterDate('2019-06-01', '2019-06-06');
var band_viz = {
  min: -1,
  max: 2.0,
  palette: ['black', 'blue', 'purple', 'cyan', 'green', 'yellow', 'red']
};
Map.addLayer(collection.mean(), band_viz, 'S5P Aerosol');
Map.setCenter(-118.82, 36.1, 5);
Map.addLayer(table)
Map.centerObject(table, 4)

```

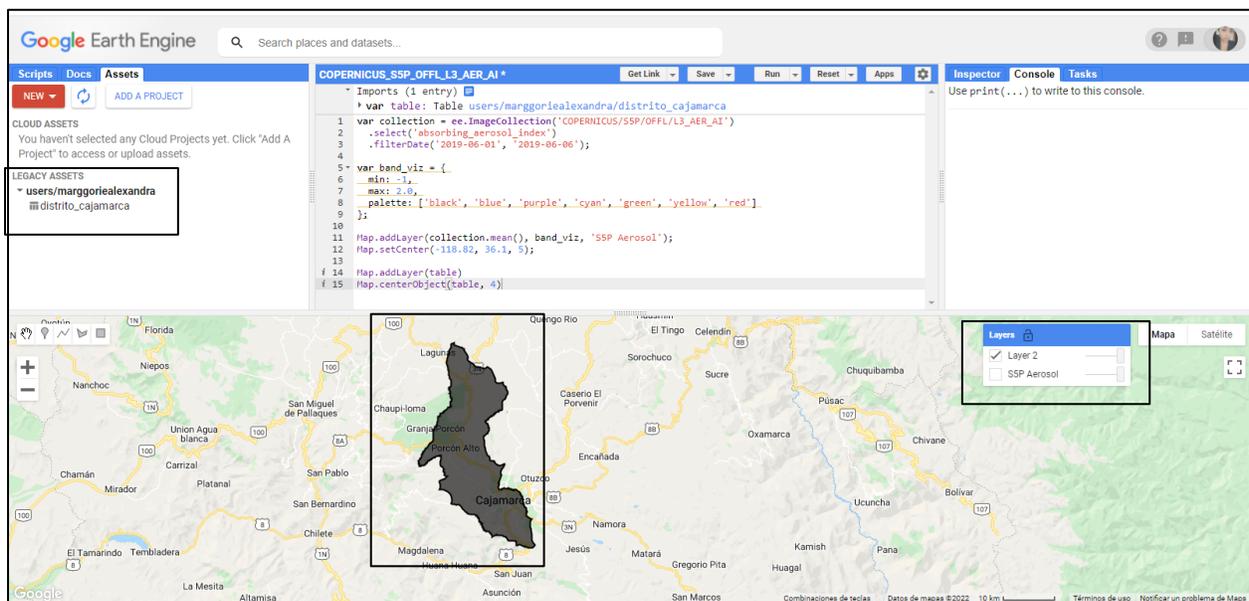


Figura 7. Shapefile incorporado en la base de información extraída del Satélite Sentinel - 5P, Imagen Satelital de Google Earth Engine.

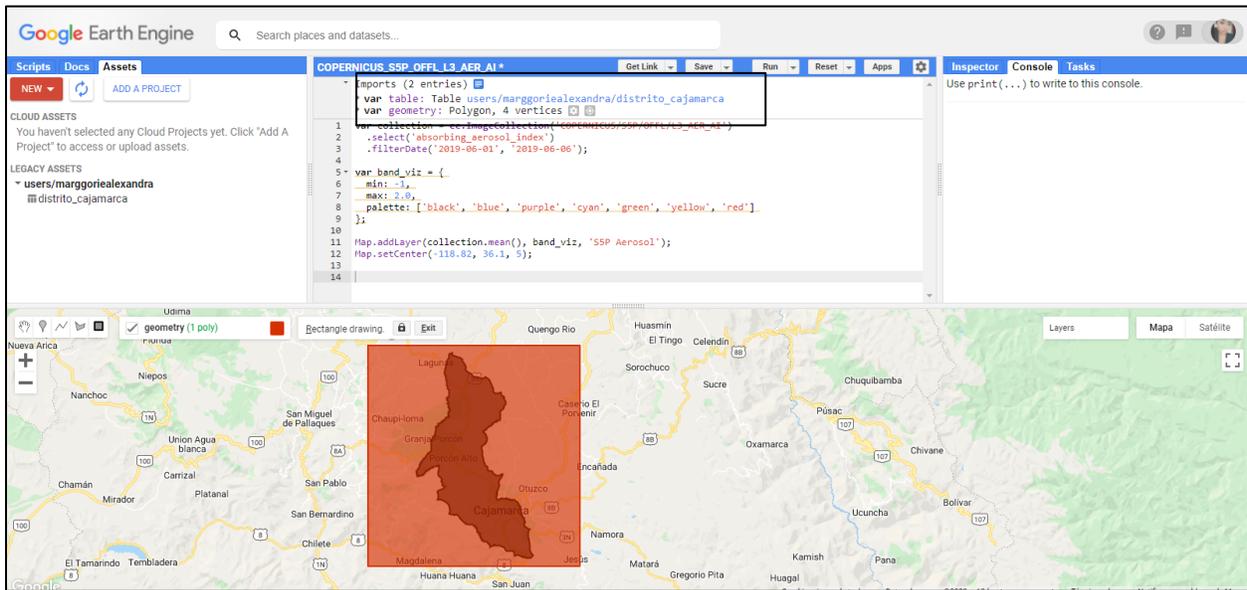


Figura 8. Creación de un polígono para delimitar el área de estudio.

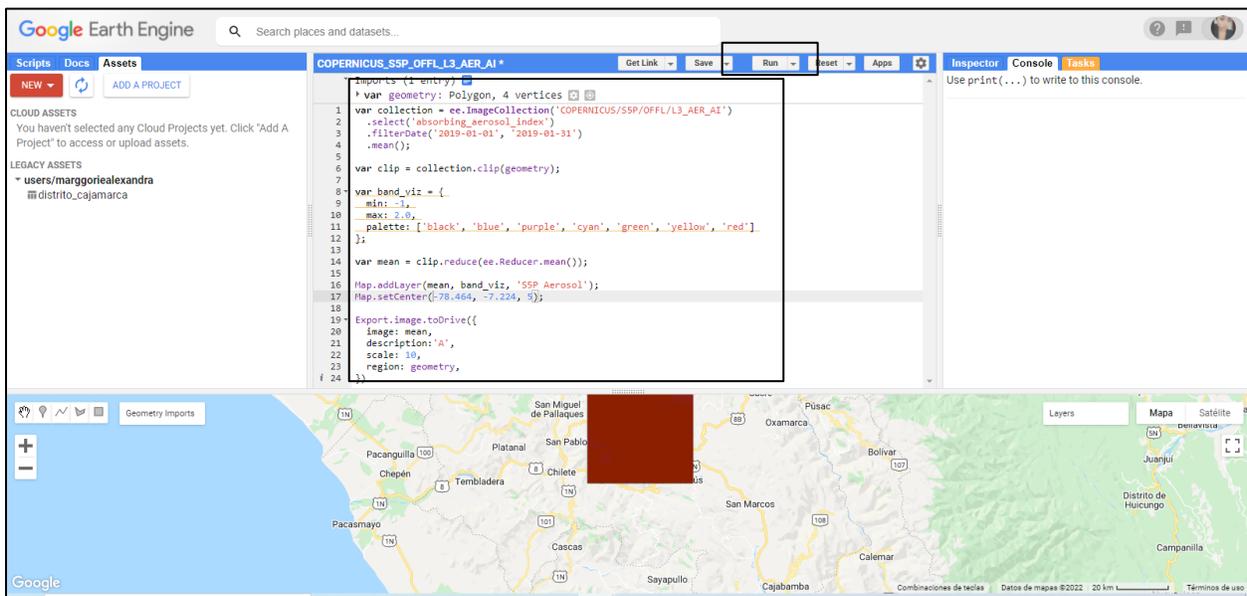


Figura 9. Código Python para recortar la imagen satelital con la información extraída del Satélite Sentinel - 5P en el área de estudio delimitada.

```
var collection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_AER_AI')
  .select('absorbing_aerosol_index')
  .filterDate('2019-01-01', '2019-01-31')
  .mean();
var clip = collection.clip(geometry);
var band_viz = {
  min: -1,
  max: 2.0,
  palette: ['black', 'blue', 'purple', 'cyan', 'green', 'yellow', 'red']
};
var mean = clip.reduce(ee.Reducer.mean());
Map.addLayer(mean, band_viz, 'S5P Aerosol');
Map.setCenter(-78.464, -7.224, 5);
Export.image.toDrive({
  image: mean,
  description: 'A',
  scale: 10,
  region: geometry,
})
```

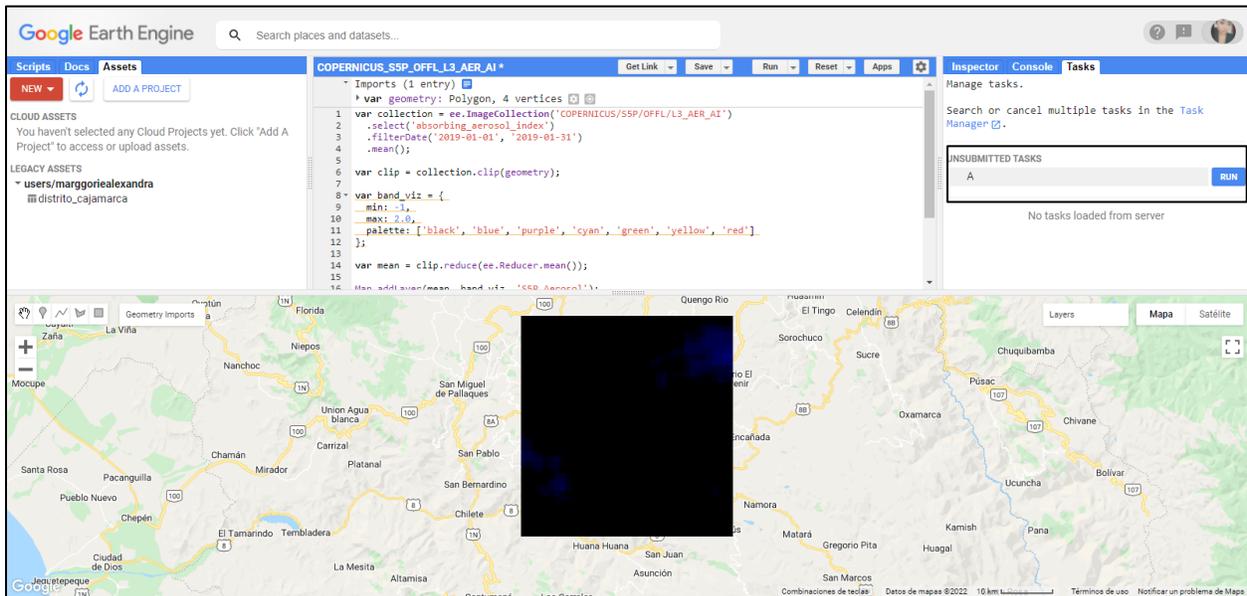


Figura 10. Recorte de la imagen satelital con la información extraída del Satélite Sentinel - 5P en el área de estudio delimitada, así mismo la descarga de la imagen satelital.

2.4.3. Finalmente, las imágenes satelitales con la información extraída del Satélite Sentinel - 5P son procesadas en ArcGis.

Por lo cual se utilizó la versión de software ArcGis 10.8, configurando el software en la zona de estudio WSGS 1984 UTM zona 17S, donde se logró proyectar las imágenes satelitales extraídas con la información satelital extraída del Satélite Sentinel - 5P de manera correcta.

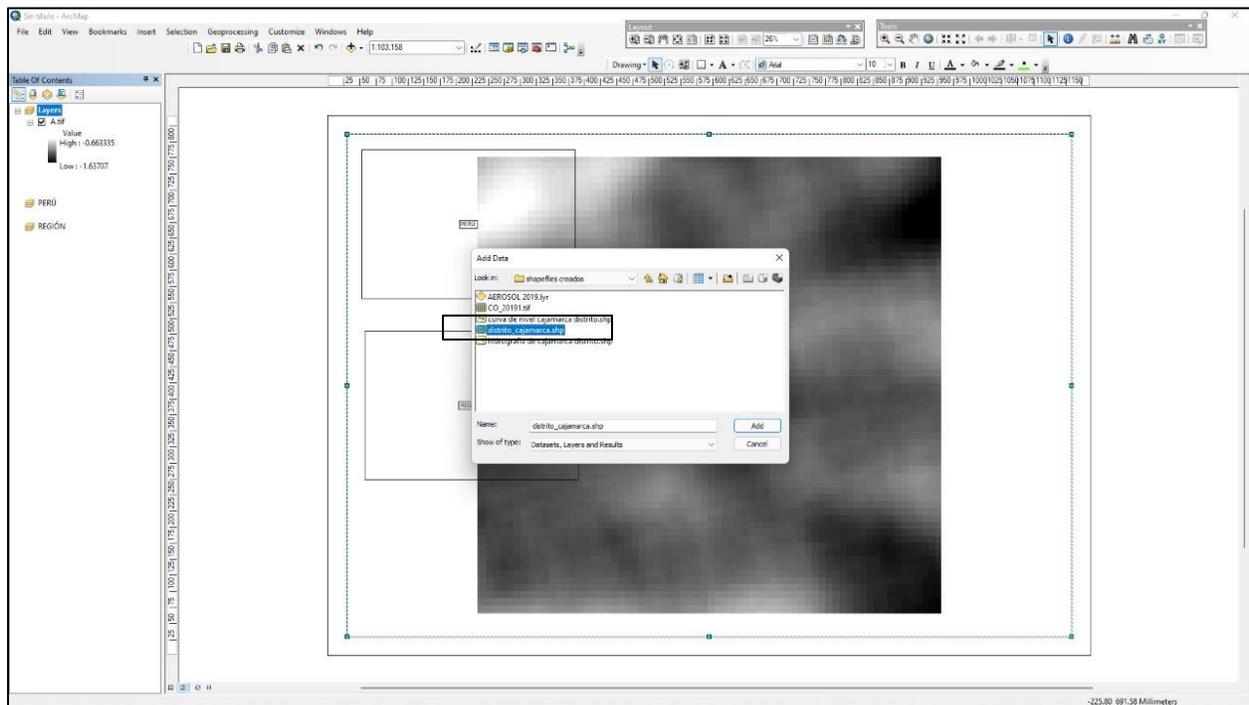


Figura 11. Imagen satelital proyectada en ArcGis 10.8

Se realizó el recorte de las imágenes satelitales descargadas en el software ArcGis 10.8, teniendo como referencia la imagen del Distrito de Cajamarca.

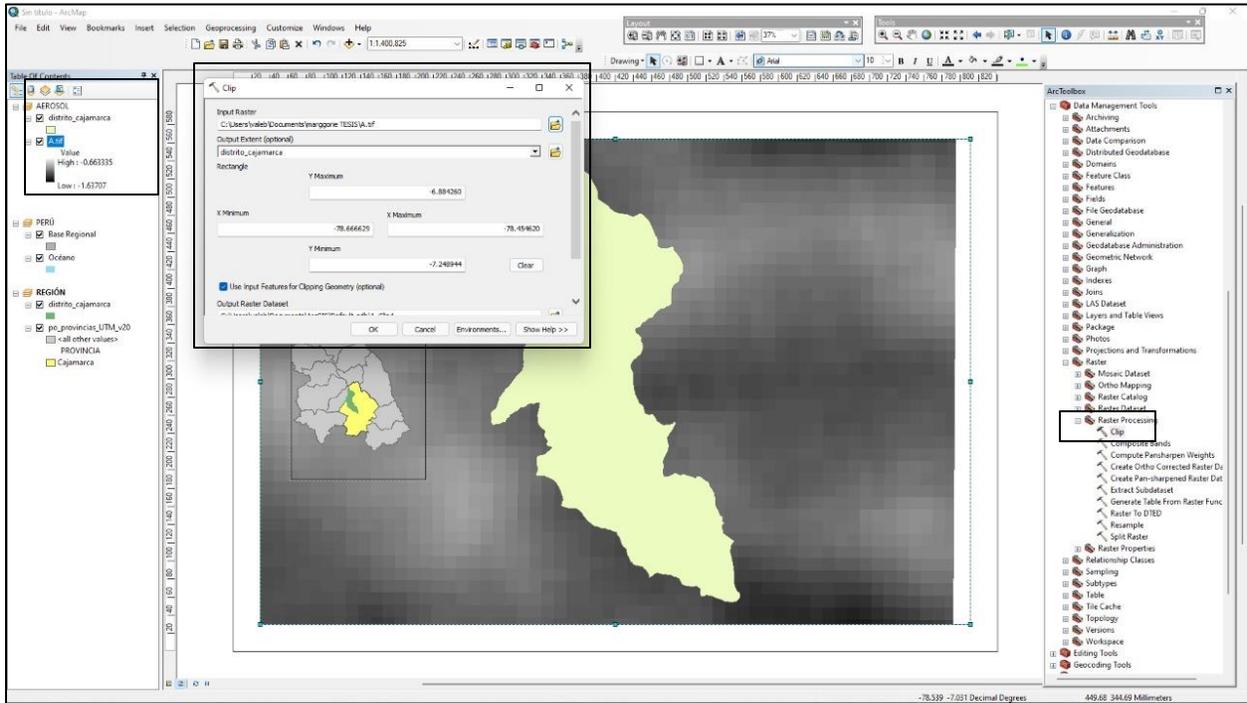


Figura 12. Recorte de la imagen Satelital.

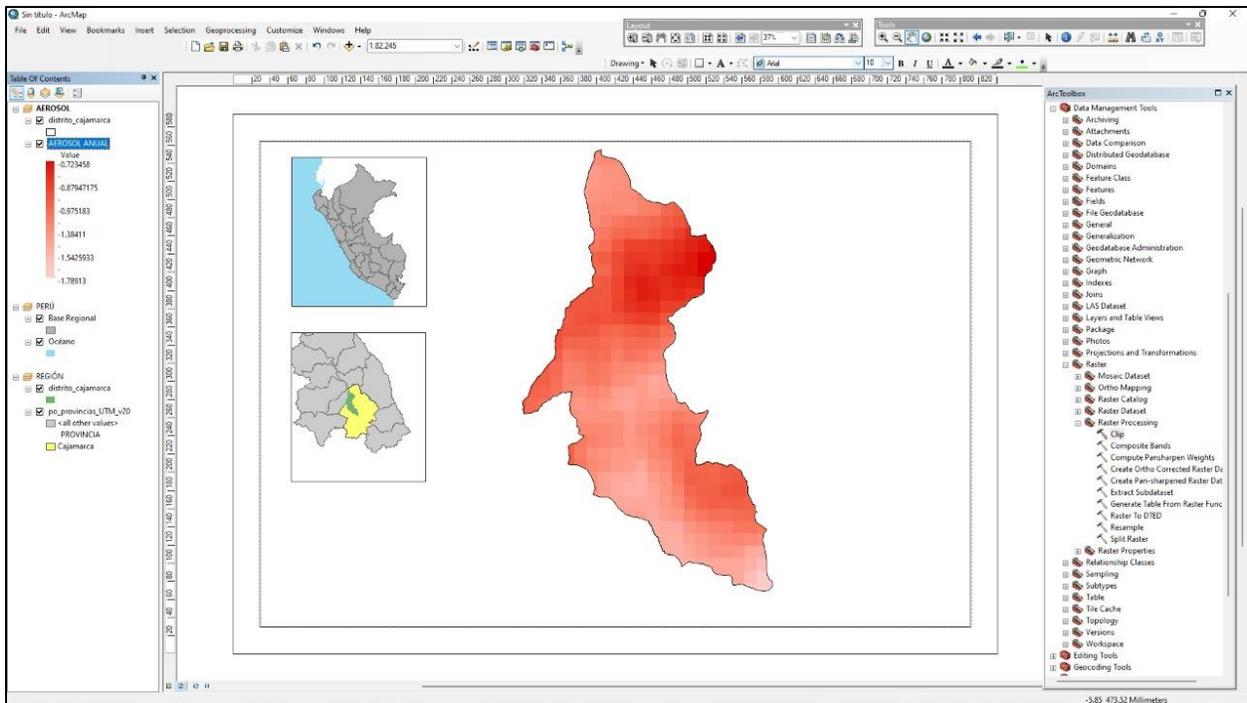


Figura 13. Proceso de Interpolación, escala de colores.

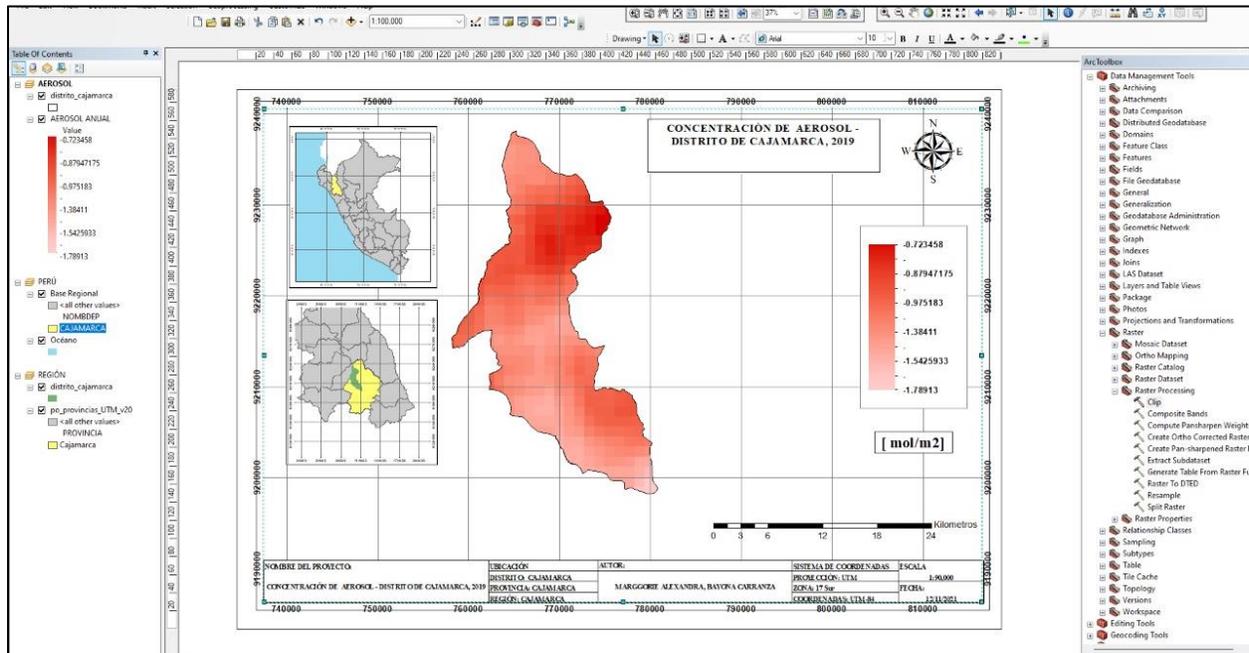


Figura 14. Modelamiento del mapa según las concentraciones atmosféricas de O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, Nubosidad, Aerosol y Formaldehído.

## 2.5. Aspectos Éticos

El presente trabajo de investigación se basó en el uso de información y datos confiables, puesto que fueron se utilizaron imágenes satelitales con información extraída del Satélite Sentinel - 5P, el cual permitió obtener las concentraciones anuales y mensuales de los siguientes contaminantes atmosféricos O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, Nubosidad, Aerosol y Formaldehído, los cuales fueron obtenidos por la plataforma Google Earth Engine, donde se utilizó el lenguaje Python para realizar la georreferenciación de la zona de estudio y la descarga de imágenes satelitales, siendo estas de uso gratuito para fines educativos y habilitada para usuarios de todo el mundo, así mismo se utilizó el software ArcGis en la versión 10.8 que permitió realizar la distribución de la información geográfica para el modelamiento de las concentraciones de dichos contaminantes atmosféricos en el Distrito de Cajamarca.

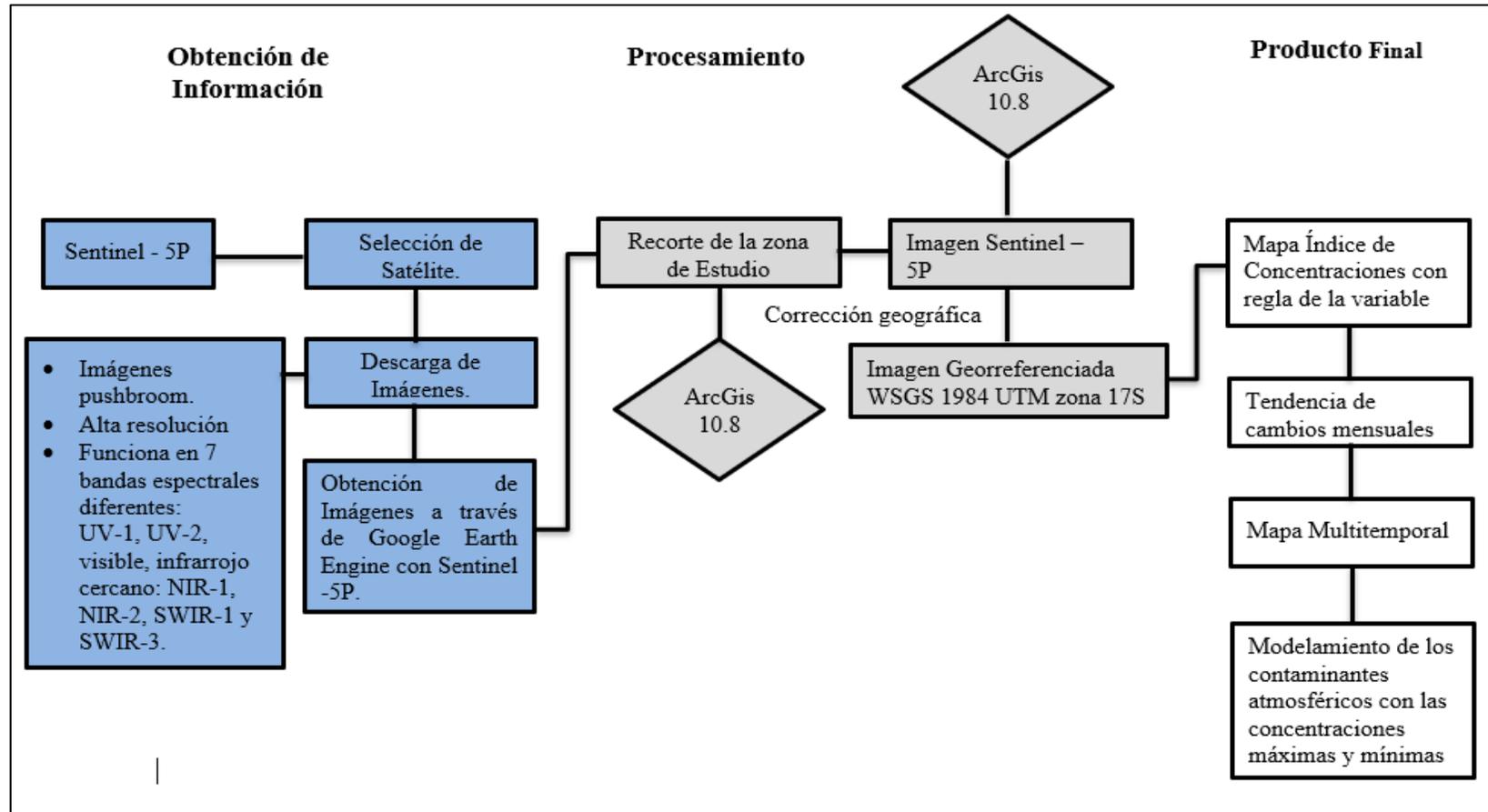


Figura 15. Diagrama de Flujo del proceso metodológico del proyecto. Elaboración propia.

## CAPÍTULO III. RESULTADOS

Los resultados que se obtuvieron en la presente investigación están en función de los objetivos planteados, es decir, Modelar la concentración de los siguientes contaminantes atmosféricos O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, Nubosidad, Aerosol y Formaldehído, empleando las imágenes satelitales proporcionadas por el Satélite Copernicus Sentinel – 5P en el software ArcGis 10.8 en la ciudad de Cajamarca durante el año 2019.

De acuerdo con los resultados obtenidos al desarrollar los modelamientos por medio del Satélite Copernicus Sentinel – 5P, utilizando el lenguaje de programación Python integrado en un Sistema de Información Geográfica ArcGis en el presente estudio.

### **3.1. Modelamientos para calidad de aire implementando el método de teledetección satelital pasiva y lenguaje de programación Python en SIG ArcGis.**

#### **3.1.1. Selección del Método de Teledetección Pasiva.**

El método de teledetección satelital pasiva es una técnica que permite la obtención de datos superficie terrestre desde sensores instalados en el espacio, teniendo en cuenta que este método detecta la radiación que emite el objeto de estudio, se realiza la selección del satélite con el que se va a trabajar en base al método mencionado.

#### **3.1.2. Selección de Satélite**

Siendo este el Satélite Copernicus Sentinel – 5P, el cual tiene como única misión monitorear la atmosfera y la distribución de diversos contaminantes atmosféricos como: O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, Nubosidad, Aerosol y Formaldehído en concentraciones

de mol/m<sup>2</sup>. En la plataforma del Satélite Sentinel -5P se puede obtener el enlace del conjunto de imágenes con los datos de concentraciones de estos contaminantes a través de la descarga de estas imágenes.

### 3.1.3. Google Earth Engine con el Lenguaje de Programación Python

La descarga de dichas imágenes se realiza a través de Google Earth Engine por medio del Lenguaje de Programación Python siendo una parte fundamental en el desarrollo y ejecución de procesos espaciales, en el cual se utilizan fórmulas para su exportación, las cuales nos permiten descargar la colección de variables con el algoritmo para cada contaminante, filtrar la data entre las fechas seleccionadas para el estudio, la banda viz en la que se encuentran las imágenes, la paleta de colores para las diferentes concentraciones del contaminante, se establece la zona de estudio con coordenadas, así mismo la fórmula para la exportación de la imagen la cual se realiza en drive.

```
var collection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_AER_AI')
.select('absorbing_aerosol_index')
.filterDate('2019-01-01', '2019-01-31')
.mean();
var clip = collection.clip(geometry);
var band_viz = {
  min: -1,
  max: 2.0,
  palette: ['black', 'blue', 'purple', 'cyan', 'green', 'yellow', 'red']
};
var mean = clip.reduce(ee.Reducer.mean());
Map.addLayer(mean, band_viz, 'S5P Aerosol');
Map.setCenter(-78.464, -7.224, 5);
Export.image.toDrive({
```

```
image: mean,  
description:'A',  
scale: 10,  
region: geometry,  
}
```

#### **3.1.4. SIG ArcGis 10.8**

El desarrollo del modelamiento se genera en ArcGis 10.8 con la imagen importada de Drive que contiene las concentraciones de los contaminantes atmosféricos O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, Nubosidad, Aerosol y Formaldehído en mol/m<sup>2</sup>, creando una regla de variable con una escala de colores para cada mes, durante el año 2019, logrando obtener una tendencia de cambios mensuales y un mapa multitemporal; como producto final el modelamiento de las concentraciones máximas y mínimas para cada contaminante atmosférico estudiado.

### 3.2. Modelado de la concentración de Ozono (O<sub>3</sub>), empleando las imágenes satelitales

proporcionadas por el Satélite Copernicus Sentinel – 5P en el software ArcGis 10.8 en la ciudad de Cajamarca durante el año 2019.

3.2.1. Modelamiento de la Ciudad de Cajamarca con las imágenes satelitales obtenidas del satélite Copernicus Sentinel - 5P de Ozono (O<sub>3</sub>), utilizando el software ArcGis 10.8, durante los meses de enero a diciembre de 2019.

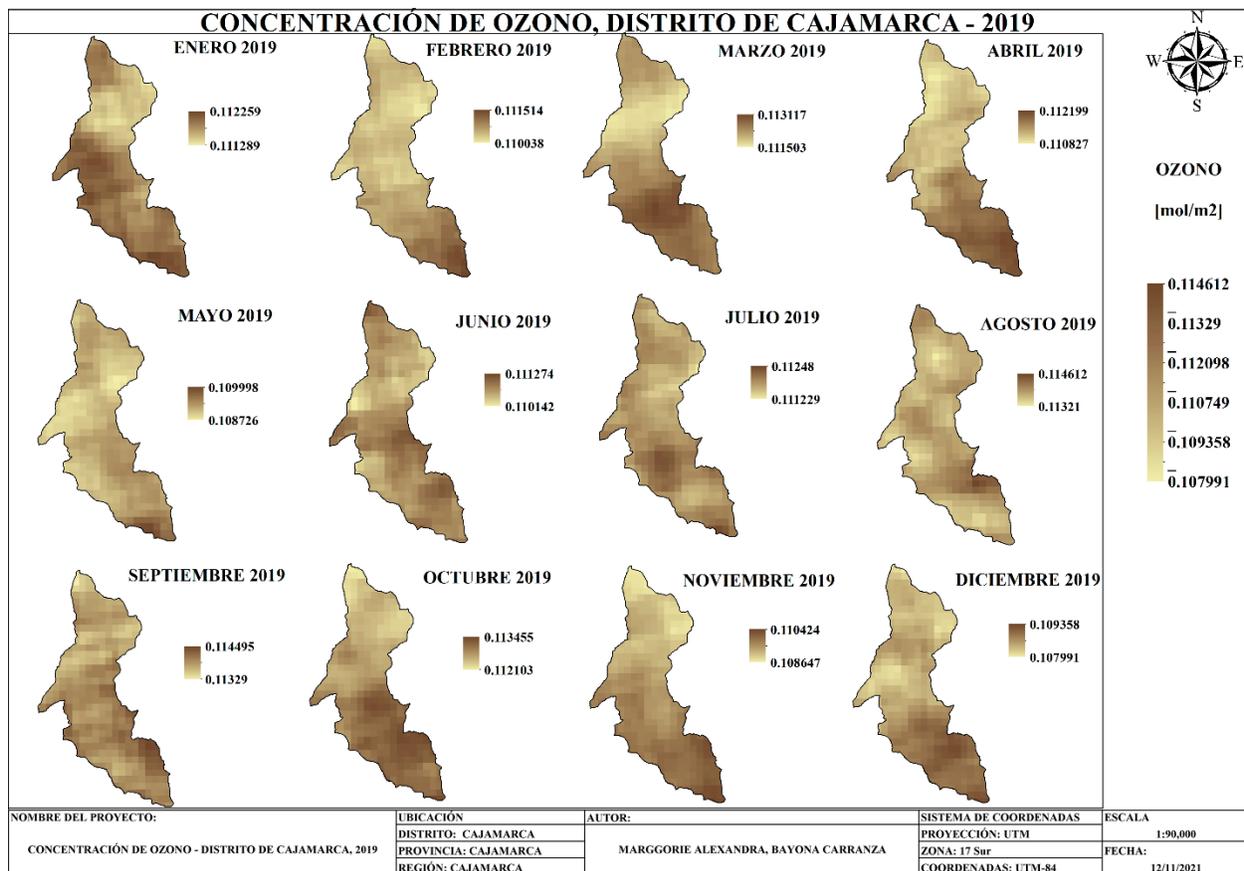


Figura 16. Modelamiento de la concentración de Ozono (O<sub>3</sub>), en la Ciudad de Cajamarca, de enero a diciembre del 2019.

Tabla 2

*Concentraciones mensuales de Ozono (O<sub>3</sub>), en la Ciudad de Cajamarca, 2019.*

<b>2019 – OZONO (O<sub>3</sub>)</b>	<b>Promedio (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Max. Concentración (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Min. Concentración (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Desviación estándar (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Variación temporal (%)</b>
<b>Enero</b>	0.111774	0.112259	1.11E-01	0.000685894	0.0%
<b>Febrero</b>	0.110776	0.111514	0.11004	0.00104369	-0.9%
<b>Marzo</b>	0.11231	0.113117	0.111503	0.00114127	1.4%
<b>Abril</b>	0.111513	0.112199	0.110827	0.000970151	-0.7%
<b>Mayo</b>	0.109362	0.109998	1.09E-01	0.00089944	-1.9%
<b>Junio</b>	0.110708	0.111274	1.10E-01	0.000800445	1.2%
<b>Julio</b>	0.1118545	0.11248	1.11E-01	0.000884591	1.0%
<b>Agosto</b>	0.113911	0.114612	1.13E-01	0.000991364	1.8%
<b>Setiembre</b>	0.1138925	0.114495	1.13E-01	0.000852064	0.0%
<b>Octubre</b>	0.112779	0.113455	0.112103	0.000956008	-1.0%
<b>Noviembre</b>	0.1095355	0.110424	0.108647	0.001256529	-2.9%
<b>Diciembre</b>	0.1086745	0.109358	1.08E-01	0.000966615	-0.8%

*Nota.* Esta tabla muestra las concentraciones de Ozono (O<sub>3</sub>), registradas en el año 2019.

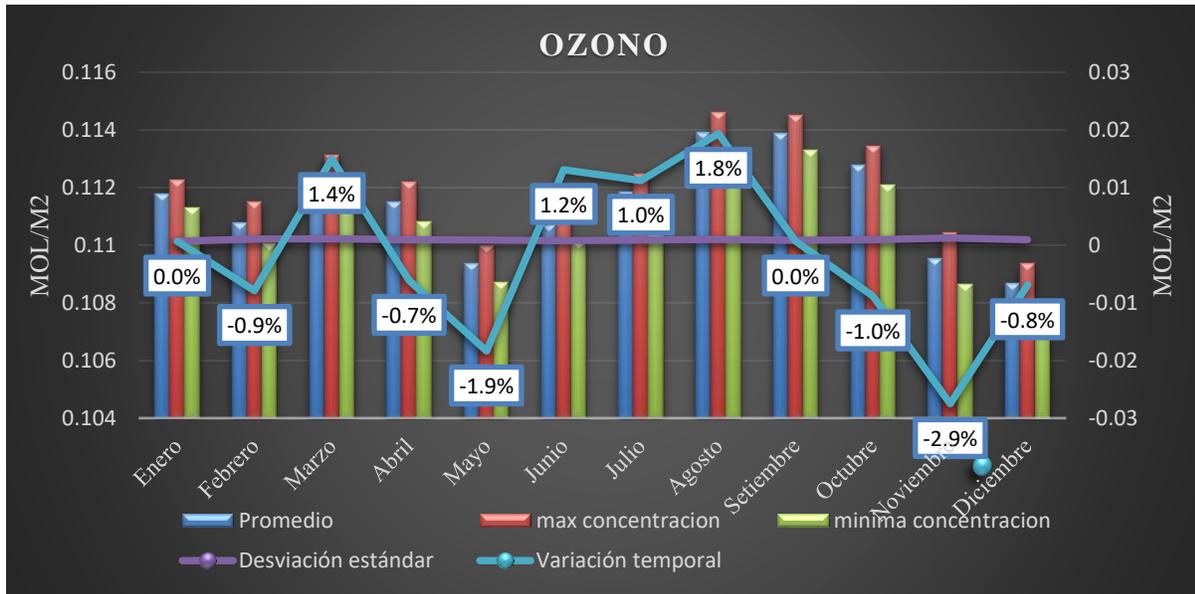


Figura 17. Variación en las concentraciones mensuales de Ozono (O<sub>3</sub>), de la Ciudad de Cajamarca, 2019.

#### Interpretación

En la figura 16 se realizó el modelamiento de las concentraciones registradas para el contaminante Ozono (O<sub>3</sub>), en la Ciudad de Cajamarca durante el año 2019, el mismo que registra diferentes concentraciones de O<sub>3</sub> dentro del área de estudio, como se puede observar en el modelamiento. En la tabla 2 se trabajó con las concentraciones mínimas y máximas generadas mensualmente para O<sub>3</sub>, procediendo con el análisis estadístico de estos datos para así obtener las variaciones porcentuales de acuerdo a los meses del año, determinando que las concentraciones más altas se registraron en los meses de agosto y septiembre, siendo el valor máximo registrado en el mes de agosto de 0.114612 mol/m<sup>2</sup>, entretanto que el valor mínimo registrado fue en el mes de diciembre de 1.08E-01 mol/m<sup>2</sup>, así mismo, se observa en la gráfica elaborada (Figura 17), la variación porcentual de las concentraciones registradas, donde podemos decir que de julio a agosto hubo un aumento del 1.8 % y descendiendo hasta 0.8 % de agosto a diciembre.

**3.3. Modelado de la concentración de Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), empleando las imágenes satelitales proporcionadas por el Satélite Copernicus Sentinel – 5P en el software ArcGis 10.8 en la ciudad de Cajamarca durante el año 2019.**

3.3.1. Modelamiento de la Ciudad de Cajamarca con las imágenes satelitales obtenidas del satélite Copernicus Sentinel - 5P de Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), utilizando el software ArcGis 10.8, durante los meses de enero a diciembre de 2019.

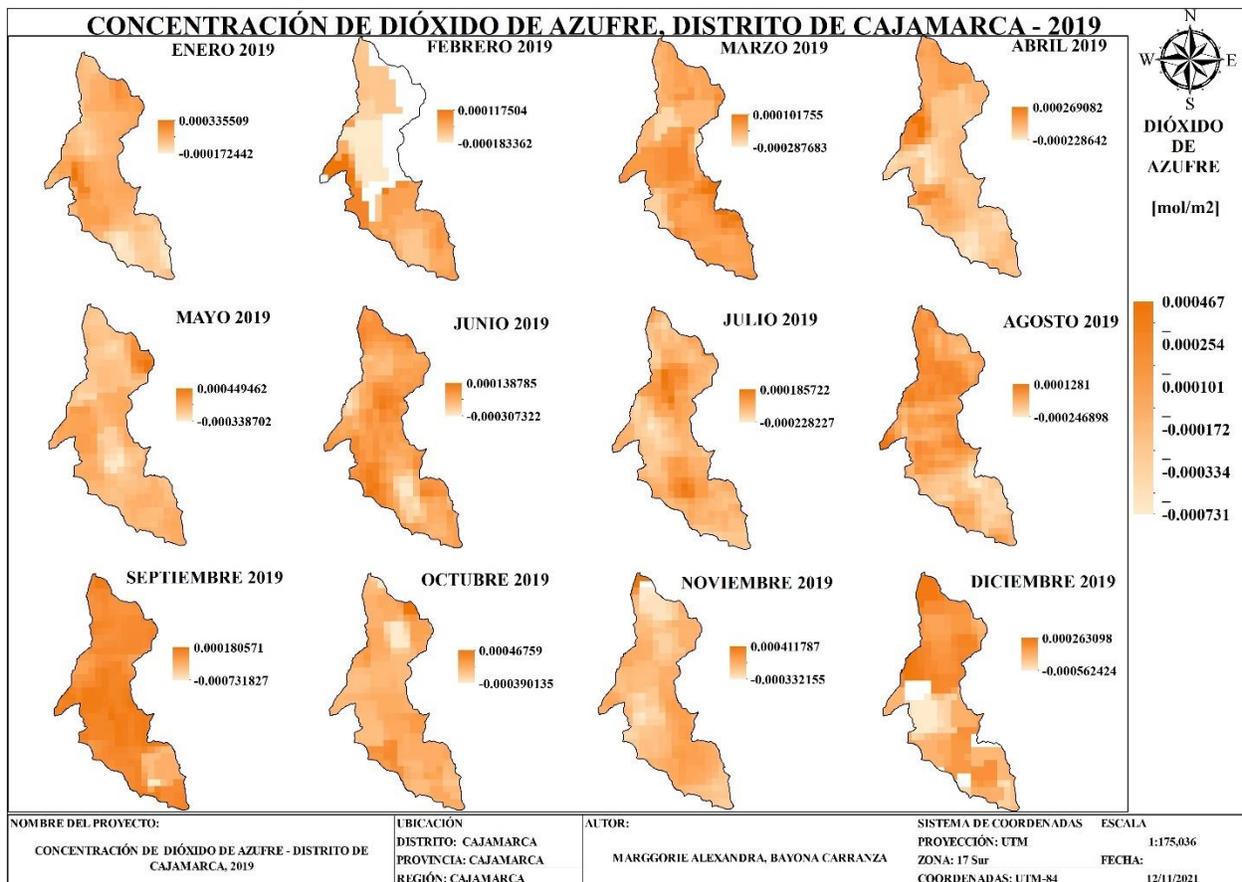


Figura 18. Modelamiento de la concentración de Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), en la Ciudad de Cajamarca, de enero a diciembre del 2019.

Tabla 3

*Concentraciones mensuales de Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), en la Ciudad de Cajamarca, 2019.*

<b>2019 - DIÓXIDO DE AZUFRE</b>	<b>Promedio (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Max. Concentración (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Min. Concentración (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Desviación estándar (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Variación temporal (%)</b>
<b>Enero</b>	8.15335E-05	0.000335509	-1.72E-04	0.000359176	0.0%
<b>Febrero</b>	-0.000032929	0.000117504	-0.00018	0.000212744	-140.4%
<b>Marzo</b>	-0.000092964	0.000101755	-0.000287683	0.000275374	182.3%
<b>Abril</b>	0.00002022	0.000269082	-0.000228642	0.000351944	-121.8%
<b>Mayo</b>	0.00005538	0.000449462	-3.39E-04	0.000557316	173.9%
<b>Junio</b>	-8.42685E-05	0.000138785	-3.07E-04	0.000315445	-252.2%
<b>Julio</b>	-2.12525E-05	0.000185722	-2.28E-04	0.000292706	-74.8%
<b>Agosto</b>	-0.000059399	0.0001281	-2.47E-04	0.000265164	179.5%
<b>Setiembre</b>	-0.000275628	0.000180571	-7.32E-04	0.000645163	364.0%
<b>Octubre</b>	3.87275E-05	0.00046759	-0.000390135	0.000606503	-114.1%
<b>Noviembre</b>	0.000039816	0.000411787	-0.000332155	0.000526046	2.8%
<b>Diciembre</b>	-0.000149663	0.000263098	-5.62E-04	0.000583732	-475.9%

*Nota.* Esta tabla muestra las concentraciones de Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), registradas en el año 2019.



Figura 19. Variación en las concentraciones mensuales de Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), de la Ciudad de Cajamarca, 2019.

### Interpretación

En la figura 18 se realizó el modelamiento de las concentraciones registradas para el contaminante Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), en la Ciudad de Cajamarca durante el año 2019, el mismo que registra diferentes concentraciones de SO<sub>2</sub> dentro del área de estudio, como se puede observar en el modelamiento. En la tabla 3 se trabajó con las concentraciones mínimas y máximas generadas mensualmente para SO<sub>2</sub>, procediendo con el análisis estadístico de estos datos para así obtener las variaciones porcentuales de acuerdo a los meses del año, determinando que las concentraciones más altas se registraron en los meses de mayo y octubre, siendo el valor máximo registrado en el mes de octubre de 0.00046759 mol/m<sup>2</sup>, entretanto que el valor mínimo registrado fue en el mes de septiembre de -7.32E-04 mol/m<sup>2</sup>, así mismo, se observa en la gráfica elaborada (Figura 19), la variación porcentual de las concentraciones donde podemos decir que de septiembre a octubre hubo un aumento del 364 % y descendiendo un 164.1 % de octubre a noviembre.

**3.4. Modelado de la concentración de Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>), empleando las imágenes satelitales proporcionadas por el Satélite Copernicus Sentinel – 5P en el software ArcGis 10.8 en la Ciudad de Cajamarca durante el año 2019.**

3.4.1. Modelamiento de la Ciudad de Cajamarca con las imágenes satelitales obtenidas del satélite Copernicus Sentinel - 5P de Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>), utilizando el software ArcGis 10.8, durante los meses de enero a diciembre de 2019.

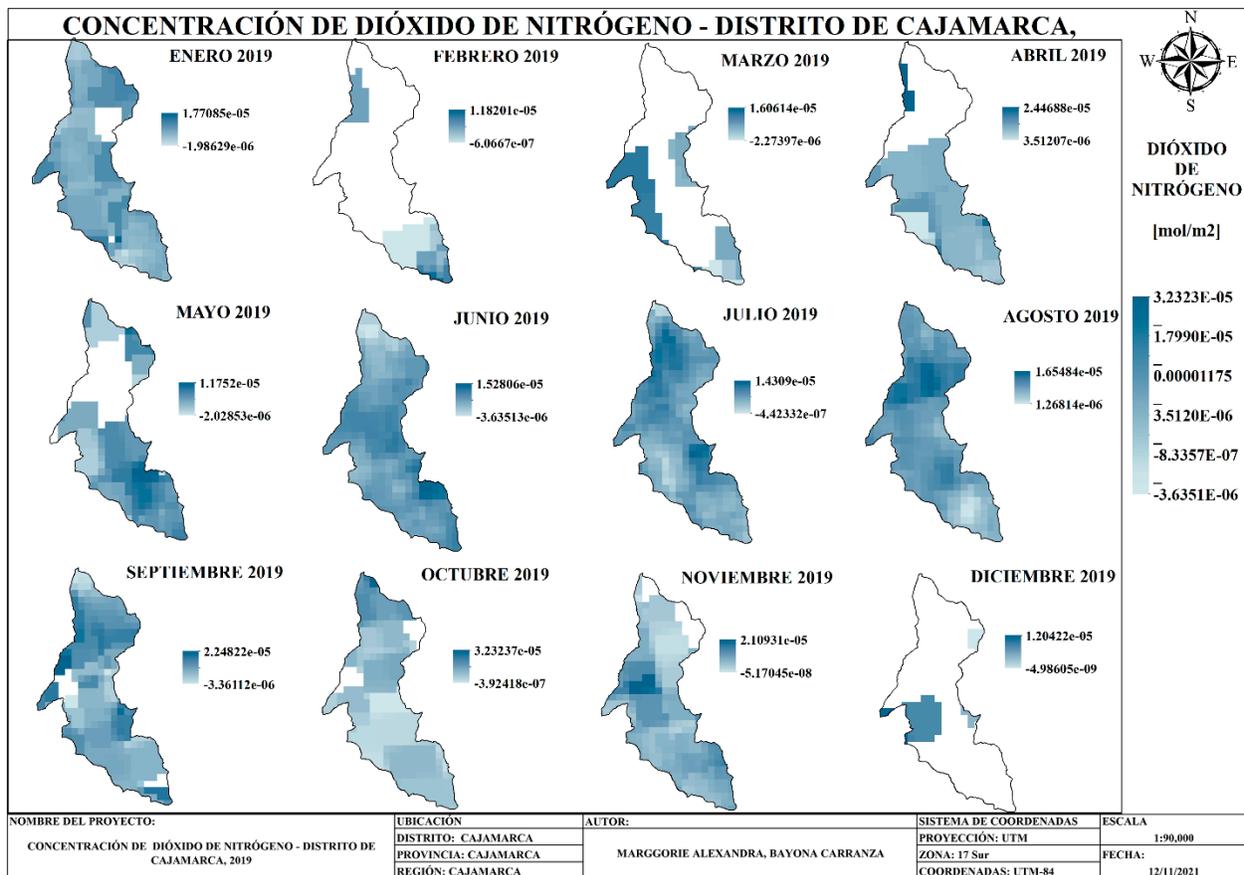


Figura 20. Modelamiento de la concentración de Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>), en la Ciudad de Cajamarca, de enero a diciembre del 2019.

Tabla 4.

*Concentraciones mensuales de Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>), en la Ciudad de Cajamarca, 2019.*

<b>2019 - DIÓXIDO DE NITRÓGENO</b>	<b>Promedio (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Max. Concentración (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Min. Concentración (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Desviación estándar (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Variación temporal (%)</b>
<b>Enero</b>	7.86111E-06	1.77E-05	-1.99E-06	1.39263E-05	0.0%
<b>Febrero</b>	5.60672E-06	1.18E-05	0.00000	8.78705E-06	-28.7%
<b>Marzo</b>	6.89372E-06	1.61E-05	-2.27E-06	1.29651E-05	23.0%
<b>Abril</b>	1.39904E-05	2.45E-05	3.51E-06	1.48186E-05	102.9%
<b>Mayo</b>	4.86174E-06	1.18E-05	-2.03E-06	9.74431E-06	-65.2%
<b>Junio</b>	5.82274E-06	1.53E-05	-3.64E-06	1.33754E-05	19.8%
<b>Julio</b>	6.93333E-06	1.43E-05	-4.42E-07	1.04308E-05	19.1%
<b>Agosto</b>	8.90827E-06	1.65E-05	1.27E-06	1.08048E-05	28.5%
<b>Septiembre</b>	9.56054E-06	2.25E-05	-3.36E-06	1.8274E-05	7.3%
<b>Octubre</b>	1.59656E-05	3.23E-05	-3.92E-07	2.31338E-05	67.0%
<b>Noviembre</b>	1.05207E-05	2.11E-05	-5.17E-08	1.49516E-05	-34.1%
<b>Diciembre</b>	6.01861E-06	1.20E-05	4.99E-09	8.51865E-06	-42.8%

*Nota.* Esta tabla muestra las concentraciones de Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>), registradas en el año 2019.

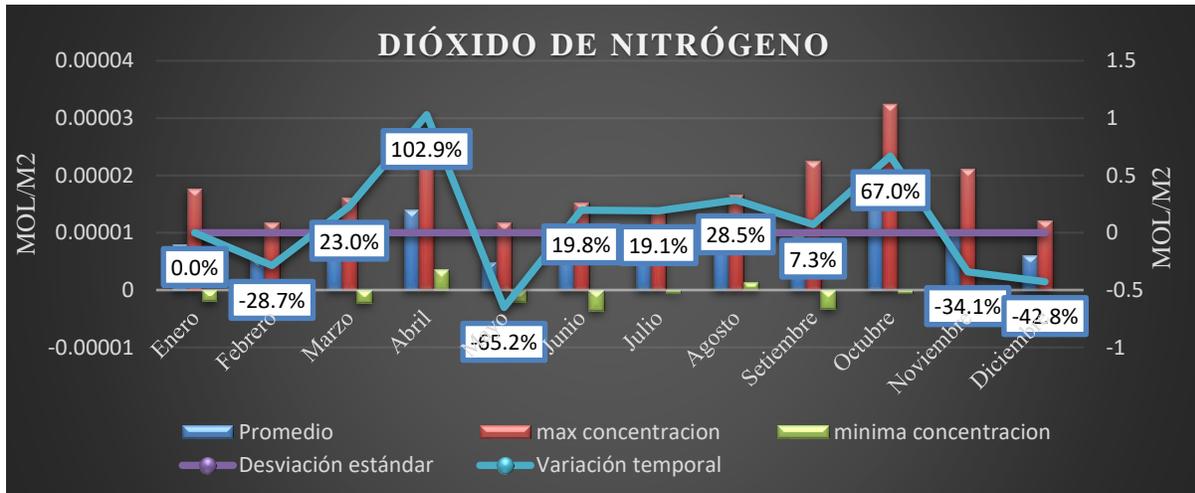


Figura 21. Variación en las concentraciones mensuales de Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>), de la Ciudad de Cajamarca, 2019.

### Interpretación

En la figura 20 se realizó el modelamiento de las concentraciones registradas para el contaminante Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>), en la Ciudad de Cajamarca durante el año 2019, el mismo que registra diferentes concentraciones de NO<sub>2</sub> dentro del área de estudio, como se puede observar en el modelamiento. En la tabla 4 se trabajó con las concentraciones mínimas y máximas generadas mensualmente para NO<sub>2</sub>, procediendo con el análisis estadístico de estos datos para así obtener las variaciones porcentuales de acuerdo a los meses del año, determinando que las concentraciones más altas se registraron en los meses de abril y octubre, siendo el valor máximo registrado en el mes de octubre de 3.23E-05 mol/m<sup>2</sup>, entretanto que el valor mínimo registrado fue en el mes de junio de -3.64E-06 mol/m<sup>2</sup>, así mismo, se observa en la gráfica elaborada (Figura 21), la variación porcentual de las concentraciones donde podemos decir que de septiembre a octubre hubo un aumento del 67 % y descendiendo un 34.1 % de octubre a noviembre, entre los meses de junio a agosto se mantuvo casi estable en un rango de 19.8 % a 28.5 %.

**3.5. Modelado de la concentración de Monóxido de Carbono (CO), empleando las imágenes satelitales proporcionadas por el Satélite Copernicus Sentinel – 5P en el software ArcGis 10.8 en la Ciudad de Cajamarca durante el año 2019.**

3.5.1. Modelamiento de la Ciudad de Cajamarca con las imágenes satelitales obtenidas del satélite Copernicus Sentinel - 5P de Monóxido de Carbono (CO), utilizando el software ArcGis 10.8, durante los meses de enero a diciembre de 2019.

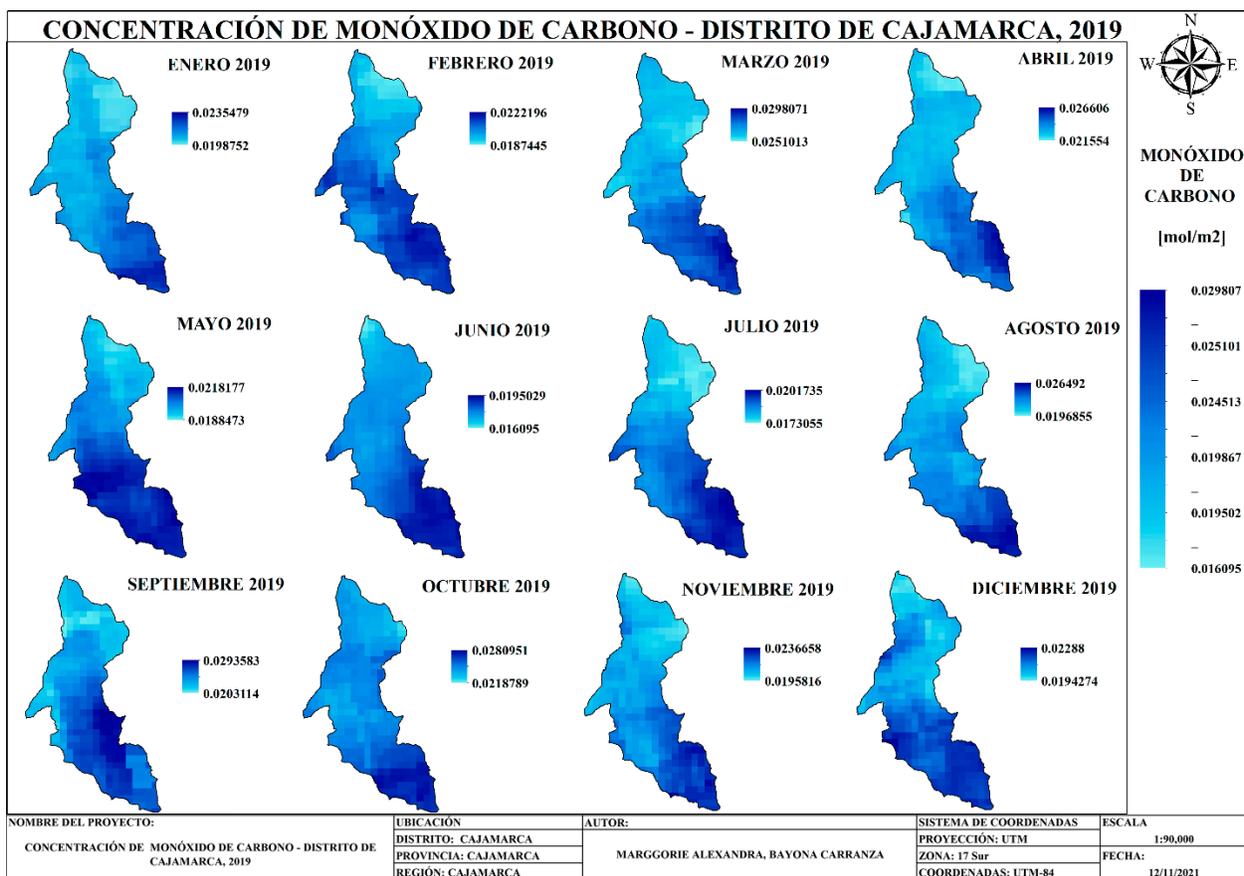


Figura 22. Modelamiento de la concentración de Monóxido de Carbono (CO), en la Ciudad de Cajamarca, de enero a diciembre del 2019.

Tabla 5

*Concentraciones mensuales de Monóxido de Carbono (CO), en la Ciudad de Cajamarca, 2019*

<b>2019 - MONÓXIDO DE CARBONO</b>	<b>Promedio (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Max. Concentración (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Min. Concentración (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Desviación estándar (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Variación temporal (%)</b>
<b>Enero</b>	0.02171155	0.0235479	1.99E-02	0.002596991	0.0%
<b>Febrero</b>	0.02048205	0.0222196	0.01874	0.002457267	-5.7%
<b>Marzo</b>	0.0274542	0.0298071	0.0251013	0.003327503	34.0%
<b>Abril</b>	0.02408	0.026606	0.021554	0.003572303	-12.3%
<b>Mayo</b>	0.0203325	0.0218177	1.88E-02	0.00210039	-15.6%
<b>Junio</b>	0.01779895	0.0195029	1.61E-02	0.002409749	-12.5%
<b>Julio</b>	0.0187395	0.0201735	1.73E-02	0.002027982	5.3%
<b>Agosto</b>	0.02308875	0.026492	1.97E-02	0.004812922	23.2%
<b>Setiembre</b>	0.02483485	0.0293583	2.03E-02	0.006397124	7.6%
<b>Octubre</b>	0.024987	0.0280951	0.0218789	0.004395517	0.6%
<b>Noviembre</b>	0.0216237	0.0236658	0.0195816	0.002887966	-13.5%
<b>Diciembre</b>	0.0211537	0.02288	1.94E-02	0.002441357	-2.2%

*Nota.* Esta tabla muestra las concentraciones de Monóxido de Carbono (CO), registradas en el año 2019.

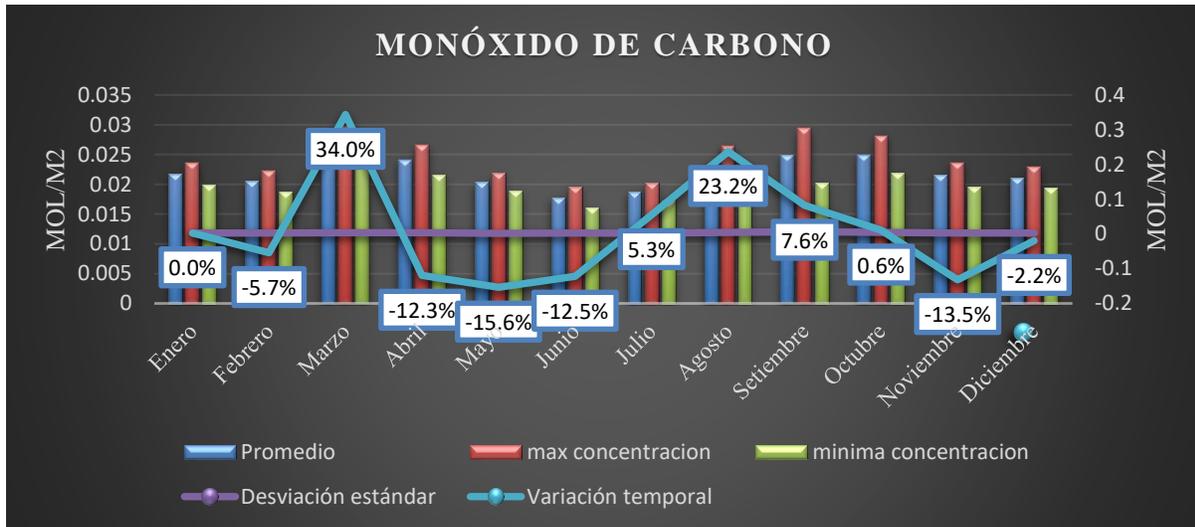


Figura 23. Variación en las concentraciones mensuales de Monóxido de Carbono (CO), de la Ciudad de Cajamarca, 2019.

### Interpretación

En la figura 22 se realizó el modelamiento de las concentraciones registradas para el contaminante Monóxido de Carbono (CO), en la ciudad de Cajamarca durante el año 2019, el mismo que registra diferentes concentraciones de CO dentro del área de estudio, como se puede observar en el modelamiento. En la tabla 5 se trabajó con las concentraciones mínimas y máximas generadas mensualmente para CO, procediendo con el análisis estadístico de estos datos para así obtener las variaciones porcentuales de acuerdo con los meses del año, determinando que las concentraciones más altas se registraron en los meses de marzo y septiembre, siendo el valor máximo registrado en el mes de marzo de  $0.0298071 \text{ mol/m}^2$ , entretanto que el valor mínimo registrado fue en el mes de junio de  $1.61\text{E-}02 \text{ mol/m}^2$ , así mismo, se observa en la gráfica elaborada (Figura 23), la variación porcentual de las concentraciones registradas, donde podemos decir que de febrero a marzo hubo un aumento del 34 % y descendiendo un 15.6 % de marzo a mayo.

### 3.6. Modelado de la concentración de Nubosidad, empleando las imágenes satelitales

proporcionadas por el Satélite Copernicus Sentinel – 5P en el software ArcGis 10.8 en la Ciudad de Cajamarca durante el año 2019.

3.6.1. Modelamiento de la Ciudad de Cajamarca con las imágenes satelitales obtenidas del satélite Copernicus Sentinel - 5P de Nubosidad, utilizando el software ArcGis 10.8, durante los meses de enero a diciembre de 2019.

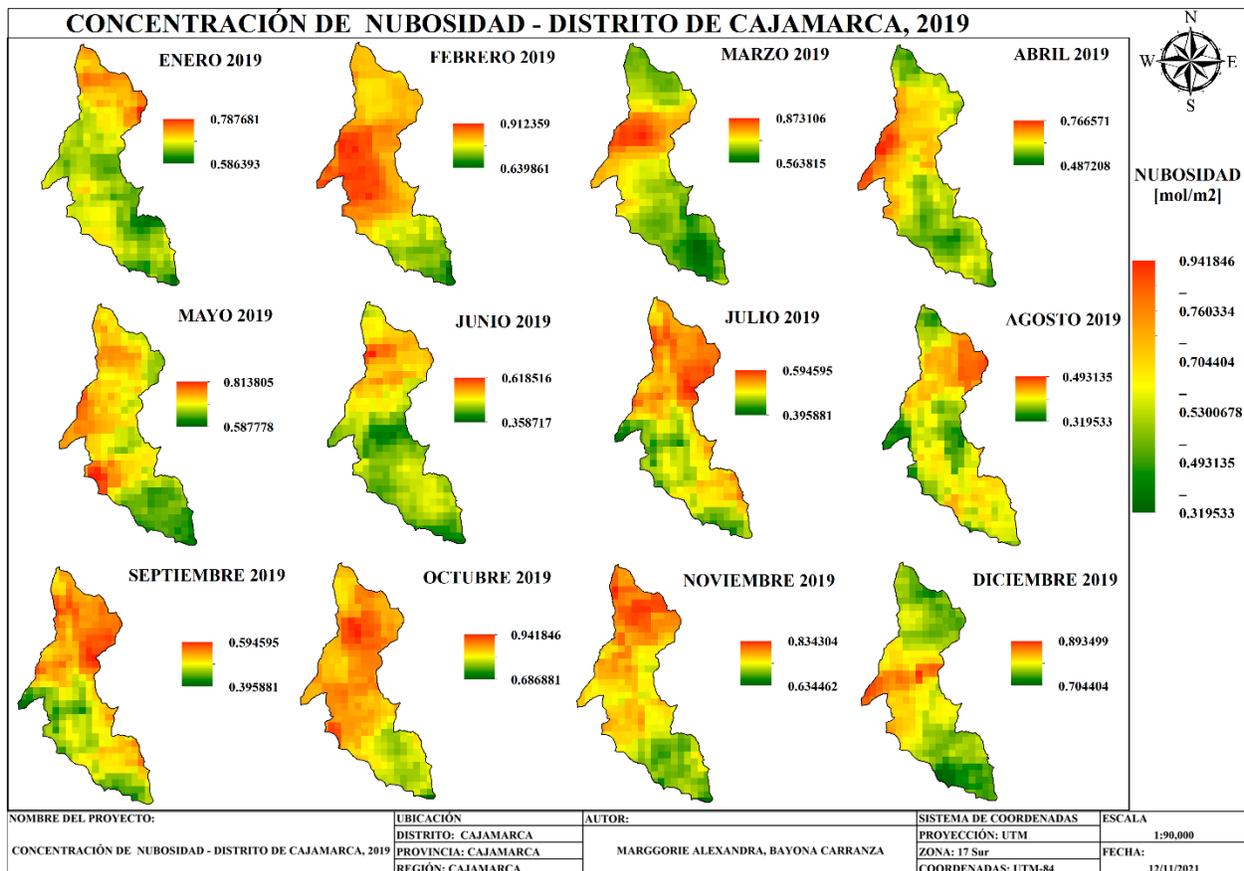


Figura 24. Modelamiento de la concentración de Nubosidad, en la Ciudad de Cajamarca, de enero a diciembre del 2019.

Tabla 6

*Concentraciones mensuales de Nubosidad, en la Ciudad de Cajamarca, 2019.*

<b>2019 - NUBES</b>	<b>Promedio (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Max. Concentración (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Min. Concentración (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Desviación estándar (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Variación temporal (%)</b>
<b>Enero</b>	0.687037	0.787681	5.86E-01	0.14233211	0.0%
<b>Febrero</b>	0.77611	0.912359	0.63986	0.192685184	13.0%
<b>Marzo</b>	0.7184605	0.873106	0.563815	0.218701763	-7.4%
<b>Abril</b>	0.6268895	0.766571	0.487208	0.197539472	-12.7%
<b>Mayo</b>	0.7007915	0.813805	5.88E-01	0.159825224	11.8%
<b>Junio</b>	0.4886165	0.618516	3.59E-01	0.183705635	-30.3%
<b>Julio</b>	0.495238	0.594595	3.96E-01	0.140512017	1.4%
<b>Agosto</b>	0.406334	0.493135	3.20E-01	0.122755151	-18.0%
<b>Setiembre</b>	0.495238	0.594595	3.96E-01	0.140512017	21.9%
<b>Octubre</b>	0.8143635	0.941846	0.686881	0.18028748	64.4%
<b>Noviembre</b>	0.734383	0.834304	0.634462	0.141309633	-9.8%
<b>Diciembre</b>	0.7989515	0.893499	7.04E-01	0.133710357	8.8%

*Nota.* Esta tabla muestra las concentraciones de Nubosidad, registradas en el año 2019.

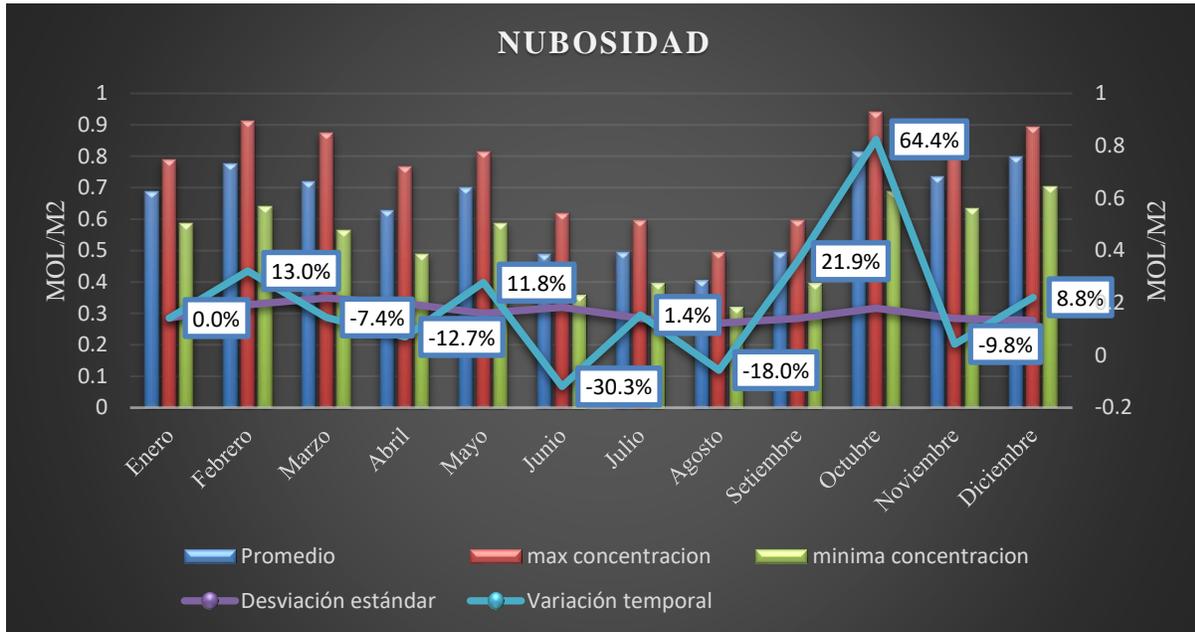


Figura 25. Variación en las concentraciones mensuales de Nubosidad, de la Ciudad de Cajamarca, 2019.

#### Interpretación

En la figura 24 se realizó el modelamiento de las concentraciones registradas para Nubosidad, en la Ciudad de Cajamarca durante el año 2019, el mismo que registra diferentes concentraciones de nubosidad dentro del área de estudio, como se puede observar en el modelamiento. En la tabla 6 se trabajó con las concentraciones mínimas y máximas generadas mensualmente de nubosidad, determinando que las concentraciones más altas se registraron en los meses de febrero y octubre, siendo el valor máximo registrado en el mes de octubre de  $0.941846 \text{ mol/m}^2$ , entretanto que el valor mínimo registrado fue en el mes de agosto de  $3.20E-01 \text{ mol/m}^2$ , así mismo, se observa en la gráfica elaborada (Figura 25), puesto que la Ciudad de Cajamarca posee un clima templado y esta hace referencia a las zonas donde se visualizan más precipitaciones para el año 2019.

### 3.7. Modelado de la concentración de Aerosol, empleando las imágenes satelitales

proporcionadas por el Satélite Copernicus Sentinel – 5P en el software ArcGis 10.8 en la Ciudad de Cajamarca durante el año 2019.

3.7.1. Modelamiento de la Ciudad de Cajamarca con las imágenes satelitales obtenidas del satélite Copernicus Sentinel - 5P de Aerosol, utilizando el software ArcGis 10.8, durante los meses de enero a diciembre de 2019.

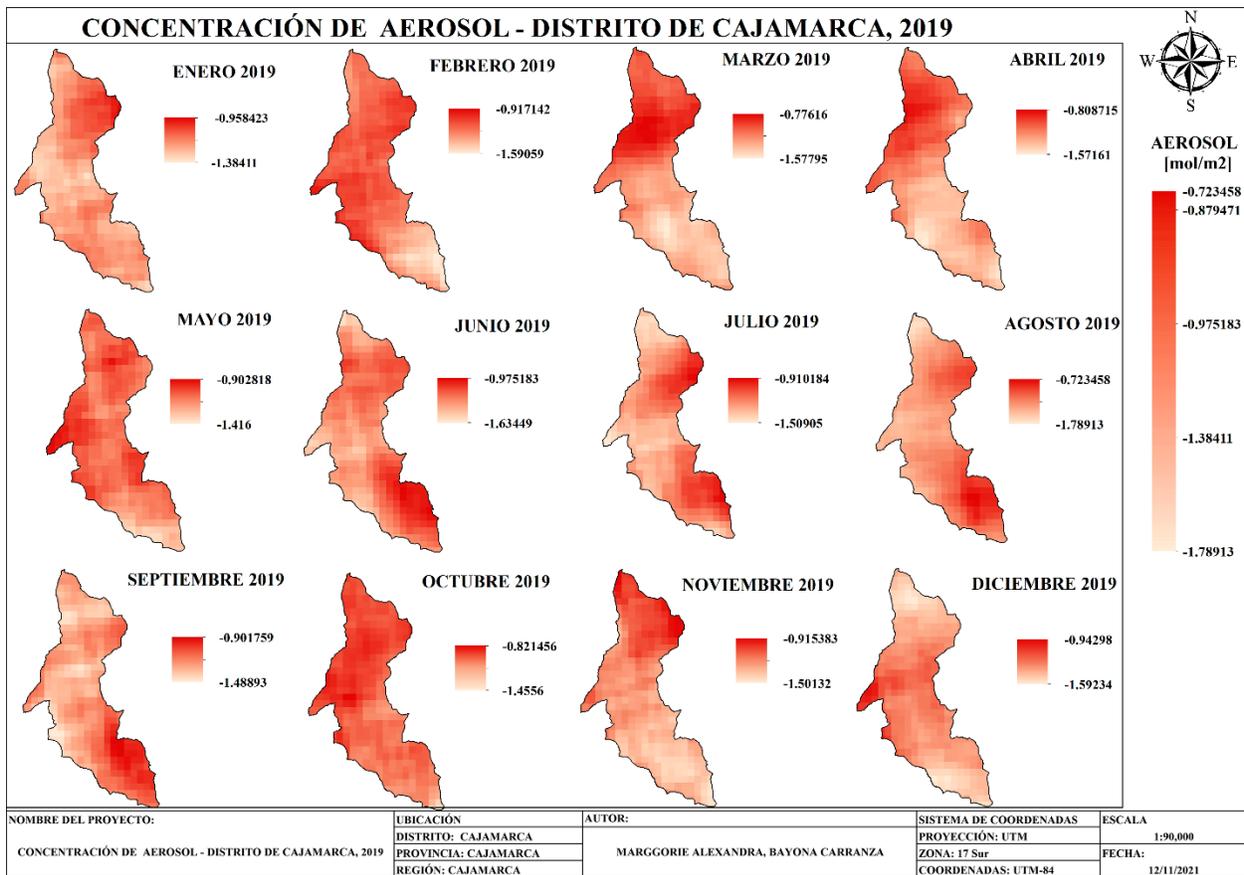


Figura 26. Modelamiento de la concentración de Aerosol, en la Ciudad de Cajamarca, de enero a diciembre del 2019.

Tabla 7

*Concentraciones mensuales de Aerosol, en la Ciudad de Cajamarca, 2019.*

<b>2019 - AEROSOL</b>	<b>Promedio (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Max. Concentración (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Min. Concentración (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Desviación estándar (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Variación temporal (%)</b>
<b>Enero</b>	-1.1712665	-0.958423	-1.38411	0.301006164	0.0%
<b>Febrero</b>	-1.253866	-0.917142	-1.59059	0.476199648	7.1%
<b>Marzo</b>	-1.177055	-0.77616	-1.57795	0.566951146	-6.1%
<b>Abril</b>	-1.1901625	-0.808715	-1.57161	0.539448228	1.1%
<b>Mayo</b>	-1.159409	-0.902818	-1.416	0.362874472	-2.6%
<b>Junio</b>	-1.3048365	-0.975183	-1.63449	0.466200451	12.5%
<b>Julio</b>	-1.209617	-0.910184	-1.50905	0.42346221	-7.3%
<b>Agosto</b>	-1.256294	-0.723458	-1.78913	0.753543898	3.9%
<b>Setiembre</b>	-1.1953445	-0.901759	-1.48893	0.415192596	-4.9%
<b>Octubre</b>	-1.138528	-0.821456	-1.4556	0.448407523	-4.8%
<b>Noviembre</b>	-1.2083515	-0.915383	-1.50132	0.414320026	6.1%
<b>Diciembre</b>	-1.26766	-0.94298	-1.59234	0.459166859	4.9%

*Nota.* Esta tabla muestra las concentraciones de Aerosol, registradas en el año 2019.

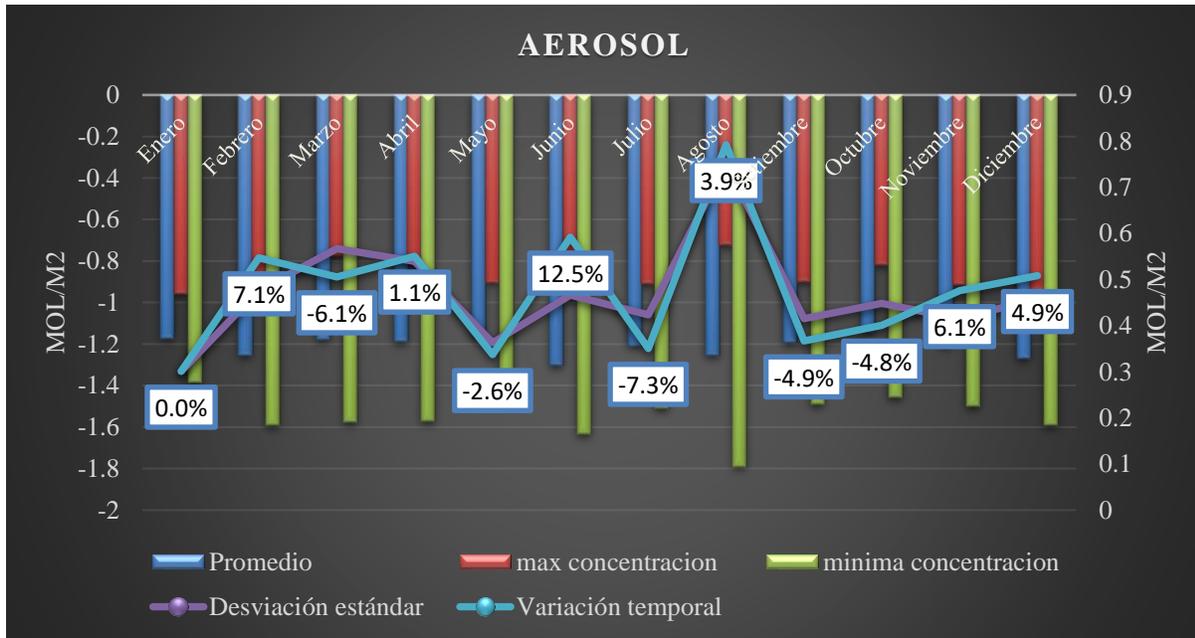


Figura 27. Variación en las concentraciones mensuales de Aerosol, de la Ciudad de Cajamarca, 2019.

### Interpretación

En la figura 26 se realizó el modelamiento de las concentraciones registradas para el contaminante Aerosol, en la ciudad de Cajamarca durante el año 2019, el mismo que registra diferentes concentraciones de dicho contaminante dentro del área de estudio, como se puede observar en el modelamiento. En la tabla 7 se trabajó con las concentraciones mínimas y máximas generadas mensualmente para Aerosol, procediendo con el análisis estadístico de estos datos para así obtener las variaciones porcentuales de acuerdo a los meses del año, determinando que las concentraciones más altas se registraron en, el mes de agosto siendo el valor máximo registrado de  $-0.723458 \text{ mol/m}^2$ , el valor mínimo registrado fue en el mes de agosto de  $-1.78913 \text{ mol/m}^2$ , así mismo, se observa en la gráfica elaborada (Figura 27), la variación porcentual de las concentraciones registradas, donde podemos decir que de julio a agosto hubo un aumento del 3.9 % y descendiendo un 4.9 % de agosto a septiembre.

**3.8. Modelado de la concentración de Formaldehído, empleando las imágenes satelitales**

proporcionadas por el Satélite Copernicus Sentinel – 5P en el software ArcGis 10.8 en la Ciudad de Cajamarca durante el año 2019.

3.8.1. Modelamiento de la Ciudad de Cajamarca con las imágenes satelitales obtenidas del satélite Copernicus Sentinel - 5P de Formaldehído, utilizando el software ArcGis 10.8, durante los meses de enero a diciembre de 2019.

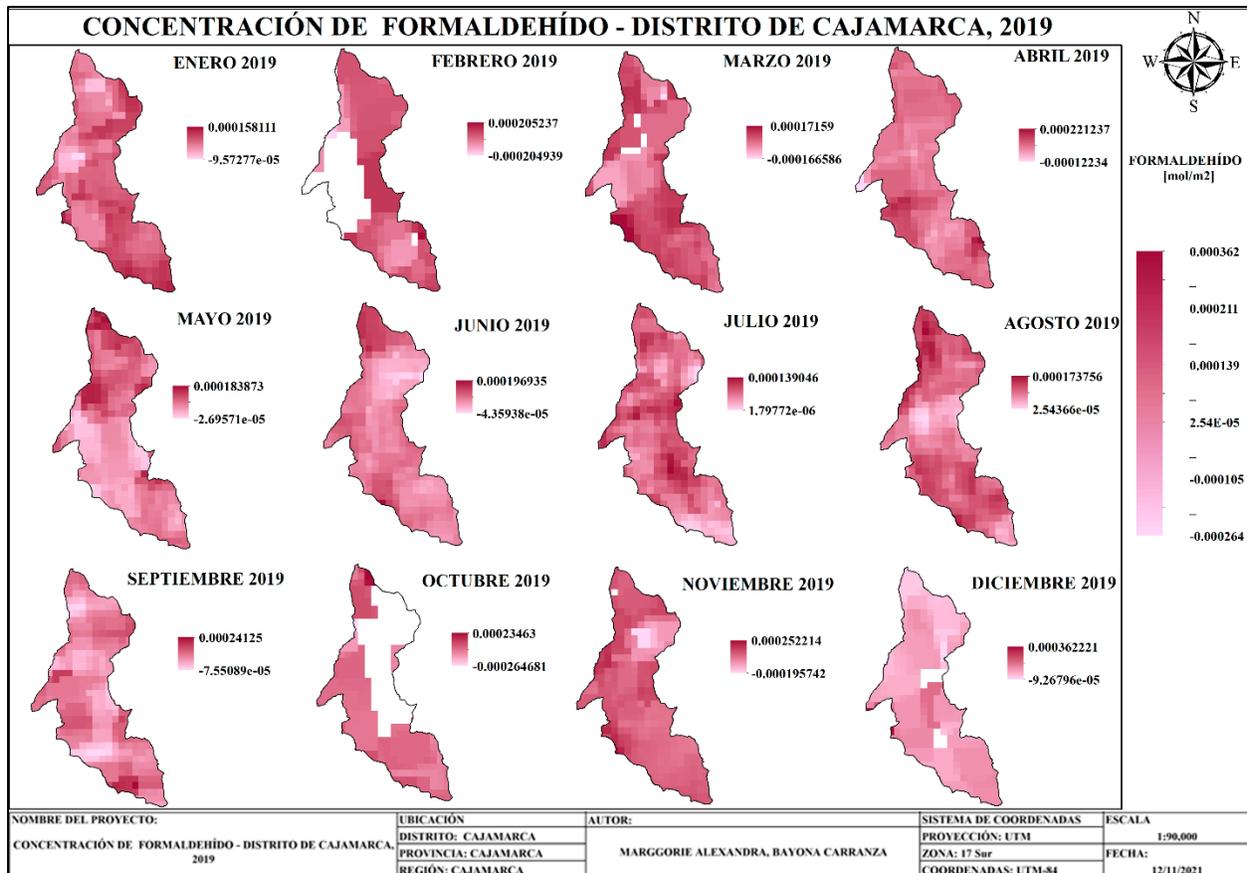


Figura 28. Modelamiento de la concentración de Formaldehído, en la Ciudad de Cajamarca, de enero a diciembre del 2019.

Tabla 8

*Concentraciones mensuales de Formaldehído, en la Ciudad de Cajamarca, 2019.*

<b>2019 – FORMALDEHÍDO</b>	<b>Promedio (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Max. Concentración (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Min. Concentración (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Desviación estándar (mol/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Variación temporal (%)</b>
<b>Enero</b>	3.11917E-05	0.000158111	-9.57E-05	0.000179491	0.0%
<b>Febrero</b>	1.49E-07	0.000205237	-0.00020	0.000290038	-99.5%
<b>Marzo</b>	0.000002502	0.00017159	-0.000166586	0.000239127	1579.2%
<b>Abril</b>	4.94485E-05	0.000221237	-0.00012234	0.000242946	1876.4%
<b>Mayo</b>	7.8458E-05	0.000183873	-2.70E-05	0.000149079	58.7%
<b>Junio</b>	7.66706E-05	0.000196935	-4.36E-05	0.00017008	-2.3%
<b>Julio</b>	7.04219E-05	0.000139046	1.80E-06	9.70492E-05	-8.2%
<b>Agosto</b>	9.95963E-05	0.000173756	2.54E-05	0.000104878	41.4%
<b>Setiembre</b>	8.28706E-05	0.00024125	-7.55E-05	0.000223982	-16.8%
<b>Octubre</b>	-1.50255E-05	0.00023463	-0.000264681	0.000353066	-118.1%
<b>Noviembre</b>	0.000028236	0.000252214	-0.000195742	0.000316753	-287.9%
<b>Diciembre</b>	0.000134771	0.000362221	-9.27E-05	0.000321663	377.3%

*Nota.* Esta tabla muestra las concentraciones de Formaldehído, registradas en el año 2019.

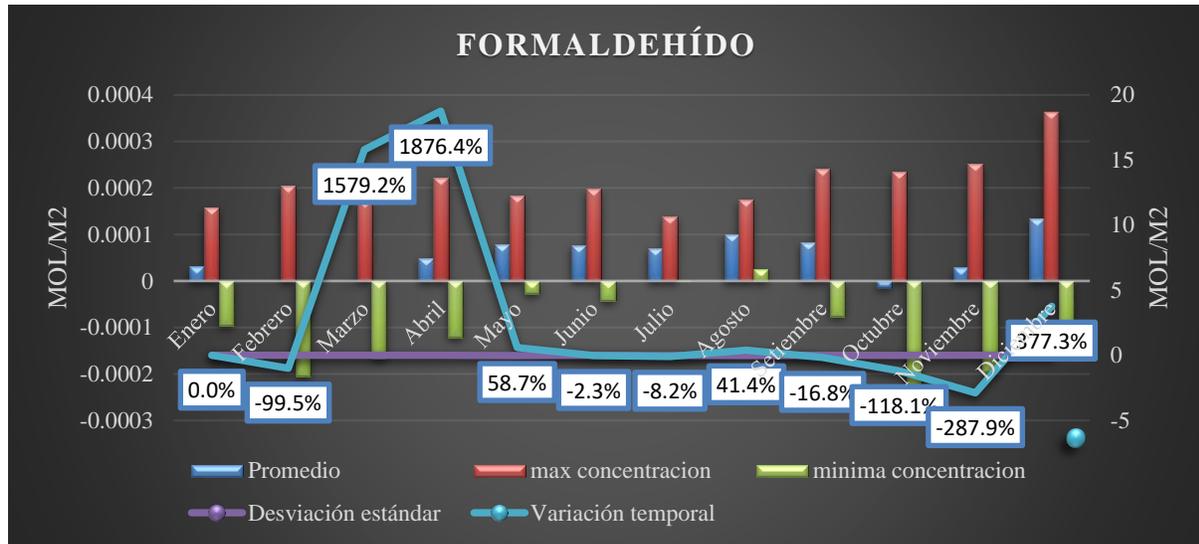


Figura 29. Variación en las concentraciones mensuales de Formaldehído, de la Ciudad de Cajamarca, 2019.

#### Interpretación

En la figura 28 se realizó el modelamiento de las concentraciones registradas para el contaminante Formaldehído, en la Ciudad de Cajamarca durante el año 2019, el mismo que registra diferentes concentraciones de dicho contaminante dentro del área de estudio, como se puede observar en el modelamiento. En la tabla 8 se trabajó con las concentraciones mínimas y máximas generadas mensualmente para Formaldehído, procediendo con el análisis estadístico de estos datos para así obtener las variaciones porcentuales de acuerdo a los meses del año, determinando que las concentraciones más altas se registraron en los meses de noviembre y diciembre, siendo el valor máximo registrado en el mes de diciembre de  $0.000362221 \text{ mol/m}^2$ , entretanto que el valor mínimo registrado fue en el mes de octubre de  $-0.000264681 \text{ mol/m}^2$ , así mismo, se observa en la gráfica elaborada (Figura 29), la variación porcentual de las concentraciones registradas, donde podemos decir que de noviembre a diciembre hubo un aumento del 377.3 % y descendiendo un 118,1 % de septiembre a octubre.

## CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 4.1. Discusión

Una de las principales limitaciones de la presente investigación fue la falta de estudios previos en esta línea investigación a nivel local, puesto que no se han empleado imágenes satelitales del Sentinel – 5P, ni tampoco se han realizado investigaciones sobre ciertos contaminantes atmosféricos, siendo estos la nubosidad, aerosol y formaldehído. Otra de las limitaciones fue la falta de datos disponibles, ya que la Ciudad de Cajamarca cuenta con estaciones de monitoreo terrestre para calidad de aire que siguen en mantenimiento y así mismo la falta de estándares aplicados al método utilizado en la presente investigación. Todo ello debería tomarse en consideración para futuros estudios, investigando aspectos que no han sido explorados aquí.

A partir de los resultados obtenidos a través del uso de imágenes Satelitales utilizando el Satélite Sentinel - 5P conjuntamente con ArcGis 10.8, permitieron obtener las concentraciones de los siguientes contaminantes atmosféricos O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, Nubosidad, Aerosol y Formaldehído, considerando las concentraciones máximas y mínimas en mol/m<sup>2</sup>, logrando realizar el modelamiento de la Calidad de Aire con teledetección Satelital en la Ciudad de Cajamarca durante el año 2019.

#### Análisis de Ozono (O<sub>3</sub>)

Las concentraciones promedio mensuales de O<sub>3</sub> mol/m<sup>2</sup> en la Ciudad de Cajamarca se encuentran en un máximo de 0.11209875 mol/m<sup>2</sup> y un mínimo de 0.110749583 mol/m<sup>2</sup>, obteniendo un promedio anual de 0.111424167 mol/m<sup>2</sup>, las mayores concentraciones se presentaron en los meses de agosto con una concentración de 0.11321 mol/m<sup>2</sup> y septiembre con

una concentración de  $0.11329 \text{ mol/m}^2$ , de igual manera se vio una disminución en el mes de diciembre con una concentración de  $0.107991 \text{ mol/m}^2$ .

Entre los resultados más parecidos mencionamos el estudio que realizó Ortega (2020), donde analizaron las concentraciones en la etapa inicial de confinamiento debido a la pandemia por COVID-19 en tres ciudades, entre estas la Ciudad de Lima, en un periodo de 15 días del mes de marzo de 2020 donde se obtuvo un promedio de  $0.11483794 \text{ mol/m}^2$ , a diferencia de la presente investigación la cual se realizó antes de la pandemia obteniendo para el mes de marzo una concentración máxima promedio de  $0.113117 \text{ mol/m}^2$ , significativamente menor a la registrada en la ciudad de lima en la etapa inicial del confinamiento, puesto que la investigación se realiza en diferentes ciudades y estas presentan distintas actividades, industrias y climas, haciendo alusión a las diferentes concentraciones del contaminante. Mientras que en la investigación de Arboleda y Vásquez (2021), en los meses en los que se registran mayores concentraciones de  $\text{O}_3$  en Ecuador, son en marzo del 2019 con una concentración de  $0.1174 \text{ mol/m}^2$  y en marzo del 2020 con una concentración de  $0.1147 \text{ mol/m}^2$ , superando significativamente la concentración registrada en la Ciudad de Cajamarca para el mes de marzo del 2019.

#### Análisis de $\text{SO}_2$

Las concentraciones promedio mensuales de  $\text{SO}_2 \text{ mol/m}^2$  en la Ciudad de Cajamarca se encuentran en un máximo de  $0.00025408 \text{ mol/m}^2$  y un mínimo de  $-0.000334152 \text{ mol/m}^2$ , obteniendo un promedio anual de  $-4.00356\text{E}-05 \text{ mol/m}^2$ , las mayores concentraciones se presentaron en los meses de mayo con una concentración de  $0.000449462 \text{ mol/m}^2$  y octubre con una concentración de  $0.00046759 \text{ mol/m}^2$ , de igual manera se visualizó una disminución en el mes de junio con una concentración de  $-0.000731827 \text{ mol/m}^2$ .

Entre los resultados más parecidos mencionamos el estudio que realizó Guerrero (2021), donde analizó las variaciones en la calidad del aire debido al confinamiento por COVID-19, en Ecuador Continental, en un periodo de nueve meses a partir del 01/12/2019 al 31/08/2020 donde se obtuvo un promedio de  $\geq 0.00028 \text{ mol/m}^2$ , a diferencia de la presente investigación la cual se llevó a cabo durante el año 2019 antes de la pandemia obteniendo un promedio anual de  $4.00356\text{E-}05 \text{ mol/m}^2$  mucho menor a la registrada en Ecuador Occidental en la etapa inicial de confinamiento, puesto que la investigación se realizó en diferentes ciudades presentando diferentes actividades, industrias y climas, haciendo alusión a la diferencia de concentraciones registradas en la ciudad de Cajamarca para el año 2019.

#### Análisis de Dióxido de Nitrógeno ( $\text{NO}_2$ )

Las concentraciones promedio mensuales de  $\text{NO}_2 \text{ mol/m}^2$  en la Ciudad de Cajamarca se encuentran en un máximo de  $1.79908\text{E-}05 \text{ mol/m}^2$  y un mínimo de  $-8.33578\text{E-}07 \text{ mol/m}^2$ , obteniendo un promedio anual de  $8.58372\text{E-}06 \text{ mol/m}^2$ , las mayores concentraciones se presentaron en los meses de abril con una concentración de  $0.000269082 \text{ mol/m}^2$  y octubre con una concentración de  $3.23\text{E-}05 \text{ mol/m}^2$ , de igual manera se visualizó una disminución en el mes de junio con una concentración de  $-3.64\text{E-}06 \text{ mol/m}^2$ .

Entre los resultados más parecidos mencionamos el estudio que realizó Ortega (2020), donde analizaron las concentraciones en la etapa inicial de confinamiento debido a la pandemia por COVID-19 en tres ciudades, entre estas la ciudad de Lima, en un periodo de 15 días del mes de marzo de 2020, donde obtuvo un promedio de  $6.11486\text{E-}05 \text{ mol/m}^2$ , a diferencia de la presente investigación la cual se realizó antes de la pandemia obteniendo para el mes de marzo una concentración máxima promedio de  $1.61\text{E-}05 \text{ mol/m}^2$  mucho menor a la registrada en la ciudad

de lima en la etapa inicial de confinamiento, puesto que la investigación se realiza en diferentes ciudades y estas presentan actividades, industrias y diferentes climas, haciendo alusión a las diferentes concentraciones del contaminante. Mientras que en la investigación de Arboleda y Vásquez (2021), en los meses en los que se registra mayores concentraciones de  $\text{NO}_2$  en Ecuador, son abril del 2019 con una concentración de  $4.97\text{E}-05 \text{ mol/m}^2$  y en junio del 2020 con una concentración de  $5.01\text{E}-05 \text{ mol/m}^2$ , superando significativamente la concentración registrada en la ciudad de Cajamarca para el mes de abril del 2019.

#### Análisis de Monóxido de Carbono (CO)

Las concentraciones promedio mensuales de  $\text{CO mol/m}^2$  en la Ciudad de Cajamarca se encuentran en un máximo de  $0.024513825 \text{ mol/m}^2$  y un mínimo de  $0.0198673 \text{ mol/m}^2$ , obteniendo un promedio anual de  $0.022190563 \text{ mol/m}^2$ , las mayores concentraciones se presentaron en los meses de marzo con una concentración de  $0.0298071 \text{ mol/m}^2$  y septiembre con una concentración de  $0.0293583 \text{ mol/m}^2$ , de igual manera se visualizó una disminución en el mes de junio con una concentración de  $1.61\text{E}-02 \text{ mol/m}^2$ .

Entre los resultados más parecidos mencionamos el estudio que realizó Ortega (2020), donde analizaron las concentraciones en la etapa inicial de confinamiento debido a la pandemia por COVID-19 en tres ciudades, entre estas la ciudad de Lima, en un periodo de 15 días del mes de marzo de 2020 donde obtuvo un promedio de  $6.11486\text{E}-05 \text{ mol/m}^2$ , a diferencia de la presente investigación la cual se realizó antes de la pandemia obteniendo para el mes de marzo una concentración máxima promedio de  $0.0298071 \text{ mol/m}^2$  mucho mayor al registrado en la ciudad de lima en la etapa inicial de confinamiento, puesto que la investigación se realiza en diferentes ciudades y estas presentan diferentes actividades, industrias y climas, haciendo alusión a las

diferentes concentraciones del contaminante. Mientras que en la investigación de Arboleda y Vásquez (2021), en los meses en los que se registra mayores concentraciones de CO en Ecuador, son marzo del 2019 con una concentración de  $0.33 \text{ mol/m}^2$  y en abril del 2020 con una concentración de  $0.028 \text{ mol/m}^2$ , superando significativamente la concentración registrada en la ciudad de Cajamarca para el mes de marzo del 2019.

#### Análisis de Nubosidad

Las concentraciones promedio mensuales de Nubosidad  $\text{mol/m}^2$  en la Ciudad de Cajamarca se encuentran en un máximo de  $0.760334333 \text{ mol/m}^2$  y un mínimo de  $0.530067833 \text{ mol/m}^2$ , obteniendo un promedio anual de  $0.645201083 \text{ mol/m}^2$ , las mayores concentraciones se presentaron en los meses de febrero con una concentración de  $0.912359 \text{ mol/m}^2$  y octubre con una concentración de  $0.941846 \text{ mol/m}^2$ , de igual manera se vio una disminución en el mes de agosto con una concentración de  $-0.000731827 \text{ mol/m}^2$ .

#### Análisis de Aerosol

Las concentraciones promedio mensuales de Aerosol  $\text{mol/m}^2$  en la Ciudad de Cajamarca se encuentran en un máximo de  $-0.87947175 \text{ mol/m}^2$  y un mínimo de  $-1.542593333 \text{ mol/m}^2$ , obteniendo un promedio anual de  $-1.211032542 \text{ mol/m}^2$ , las mayores concentraciones se presentaron en los meses de marzo con una concentración de  $-0.77616 \text{ mol/m}^2$  y agosto con una concentración de  $-0.723458 \text{ mol/m}^2$ , de igual manera se vio una disminución en el mes de junio con una concentración de  $-1.78913 \text{ mol/m}^2$ .

### Análisis de Formaldehído

Las concentraciones promedio mensuales de Formaldehído mol/m<sup>2</sup> en la Ciudad de Cajamarca se encuentran en un máximo de 0.000211675 mol/m<sup>2</sup> y un mínimo de -0.000321663 mol/m<sup>2</sup>, obteniendo un promedio anual de 5.32741E-05 mol/m<sup>2</sup>, las mayores concentraciones se presentaron en los meses de mayo con una concentración de 0.000449462 mol/m<sup>2</sup> y octubre con una concentración de 0.00046759 mol/m<sup>2</sup>, de igual manera se vio una disminución en el mes de junio con una concentración de -0.000731827 mol/m<sup>2</sup>.

### 4.2. Conclusiones

El presente estudio llega a las siguientes conclusiones:

- Se puede concluir que al recopilar las imágenes satelitales a través del Satélite Copernicus Sentinel - 5P de los siguientes contaminantes atmosféricos O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, Nubosidad, Aerosol y Formaldehído presentes en la Ciudad de Cajamarca durante los meses de enero a diciembre del 2019, se logró emplear Teledetección Satelital como un nuevo método de monitoreo para evaluar la calidad del aire y así poder visualizar las variaciones mensuales de estos contaminantes.
- Se pudo concluir con la elaboración del modelamiento de los mapas específicos de los siguientes contaminantes atmosféricos O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, Nubosidad, Aerosol y Formaldehído que con las imágenes obtenidas del Satélite Copernicus Sentinel - 5P y utilizando el software ArcGis 10.8, se analizó la distribución espacial mensual para cada contaminante, realizando un análisis estadístico para obtener las variaciones porcentuales de todo el año 2019, realizando gráficos para una mejor visualización.

- Como demuestra la investigación al realizar los modelamientos de las concentraciones de los contaminantes atmosféricos, empleando las imágenes satelitales proporcionadas por el Satélite Sentinel -5P en el software ArcGis 10.8 en la Ciudad de Cajamarca durante el año 2019, se logró conocer el comportamiento de estos contaminantes en la atmósfera de dicha ciudad, durante el tiempo analizado y así mismo observar la variación mensual de las concentraciones de estos contaminantes.
- En conclusión, de acuerdo con los objetivos planteados, se logró cumplir en un 95%, puesto que se realizó el modelamiento de los contaminantes atmosféricos con sus concentraciones máximas y mínimas, así como un análisis estadístico para obtener las variaciones mensuales y porcentuales, demostrando que si se puede realizar dichos modelamientos con teledetección Satelital, siendo un limitante la falta de políticas, normas y estándares aplicados a este método por ser nuevo, así mismo la escasa data encontrada para monitoreo terrestre en ese año, ya que las unidades están en  $\text{mol}/\text{m}^2$ , a diferencia del ECA para aire que establece las concentraciones en  $\text{ug}/\text{m}^3$  y no siendo factible realizar la comparación entre estos.
- Por lo cual se recomienda realizar más estudios que ayuden a corroborar la información obtenida a través del satélite con la información que se tiene a través de un monitoreo terrestre, con un estudio de comparación de datos, siendo una limitante que estos se encuentren en diferentes unidades de medida, mencionando que no es posible determinar la calidad de aire con una o dos estaciones de monitoreo terrestre, ya que para realizar un monitoreo de esta magnitud se necesita data diaria y más estaciones de monitoreo en diferentes puntos de la Ciudad de Cajamarca.

## REFERENCIAS

- Alva Huamán, D. A. (2019). *Concentración de Material Particulado, Monóxido de Carbono, Dióxido de Azufre y Dióxido de Nitrógeno en la Planta de Producción de Óxido de Calcio Puyucana, Cajamarca 2018*. Unidad de Posgrado de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Araujo Sánchez, C. (2016). *Costos externos de la contaminación ambiental del aire en la ciudad de Cajamarca*. Universidad Nacional de Cajamarca. Recuperado de <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/1361>
- Arboleda Guerrero, A. S. & Vásquez Taco, J. D. (2021). *Evaluación de datos satelitales del sensor de calidad de aire TROPOMI - Sentinel 5P para el Ecuador entre los años 2018 a 2020*. Universidad Politécnica Salesiana Sede Quito.
- Dagnino, J. (2014). Tipos de Estudios. Rev. Chil Anest, volumen (43), pp. 104-108. doi: /10.25237/revchilanestv43n02.05
- Emaze. (2016). *Presentaciones: Investigación Retrospectiva*. Recuperado de <https://app.emaze.com/user/yasbeidy>
- ESA. European Space Agency. (2021). *Earth's climate and atmosphere. Agencia Nacional Europea*. Recuperado en [https://www.esa.int/Enabling\\_Support/Preparing\\_for\\_the\\_Future/Discovery\\_and\\_Preparation/Earth\\_s\\_climate\\_and\\_atmosphere](https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/Earth_s_climate_and_atmosphere).
- García de Pedraza, L. & García Vega, J. (s. f.). *Las Nubes como indicadores del Tiempo*. Ministerio De Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Guerrero García, F. M. (2021). *Análisis de la variación en la calidad del aire debido al confinamiento por COVID-19 en el Ecuador Continental*. Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción. Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente. Universidad de las Fuerzas Armadas.

- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. d. (2014). *Metodología de la Investigación*. McGRAW-HILL / Interamericana Editores, S.A. DE C.V. Recuperado de <https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>
- Ialongo, I., Virta, H., Eskes, H., Hovila, J., & Douros, J. (2020). *Comparison of TROPOMI/Sentinel-5 Precursor NO2 observations with ground-based measurements in Helsinki*. *Atmospheric Measurement Techniques*. 13(1), 205–218. Recuperado en <https://doi.org/10.5194/amt-13-205-2020>
- Lorente, A., Boersma, K. F., Eskes, H. J., Veefind, J. P., VanGefen, J. H.G. M., de Zeeuw, M. B., C. Denier van derGon, H.A., Beirle, S. & Krol, M. C. (2019). *Quantification of nitrogen oxides emissions from build-up of pollution over París with TROPOMI*. *Scientific Reports*. Natureresearch.
- Marino, D. J. G. (2011). *Estudio teórico experimental sobre respuestas biológicas a compuestos orgánicos de relevancia ambiental*. Tesis Doctorado. Universidad Nacional de La Plata.
- Martínez Vega, J. & Martín Isabel, M. P. (2010). *Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente*. Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CSIC). Red Nacional de Teledetección Ambiental.
- Moscoso Vanegas, D. L., Astudillo Alemán, A. L. & Vásquez Freire, V. E. (2015). *Modelamiento de la calidad del aire en la ciudad de Cuenca-Ecuador*. TECKNE Innovación e Investigación en Ingeniería 12(2).
- Ortega Candel, J. M. (2018). *Hacking ético con herramientas Python. Hacking / Cracking. Seguridad Informática*.
- Ortega Mamani, M.A. (2020). *Influencia del confinamiento social por COVID-19 en los gases de la atmósfera en Bogotá, Buenos Aires, Lima, Quito y Santiago de Chile*. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental.

Puerta Tuesta, R. & Bravo Morales, N. (2011). *ArcGis Básico 10*. Facultad Recursos Naturales Renovables. Universidad Nacional Agraria de la Selva.

Rudas Gallardo, S P. (2013). *Determinación de Concentraciones de Monóxido de Carbono (CO) En La Estación De Monitoreo De Santa Teresita De La Ciudad De Cajamarca*. Maestría en Ciencias. Universidad Nacional de Cajamarca.

SENAMHI. (2020). *Informe de Vigilancia de la calidad del aire Área Metropolitana de Lima y Callao*. Recuperado de [https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/349/Vigilancia-calidad-aire-%C3%A1rea%20Metropolitana-Lima-Callao\\_Abr-2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/349/Vigilancia-calidad-aire-%C3%A1rea%20Metropolitana-Lima-Callao_Abr-2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Sotomayor Torres, A. E. & Marín Vallejos, G. M. (2010). *Evaluación e interpretación de las concentraciones de dióxido de nitrógeno y dióxido [de] azufre en el aire de Lima Metropolitana*. Facultad de Farmacia y Bioquímica. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

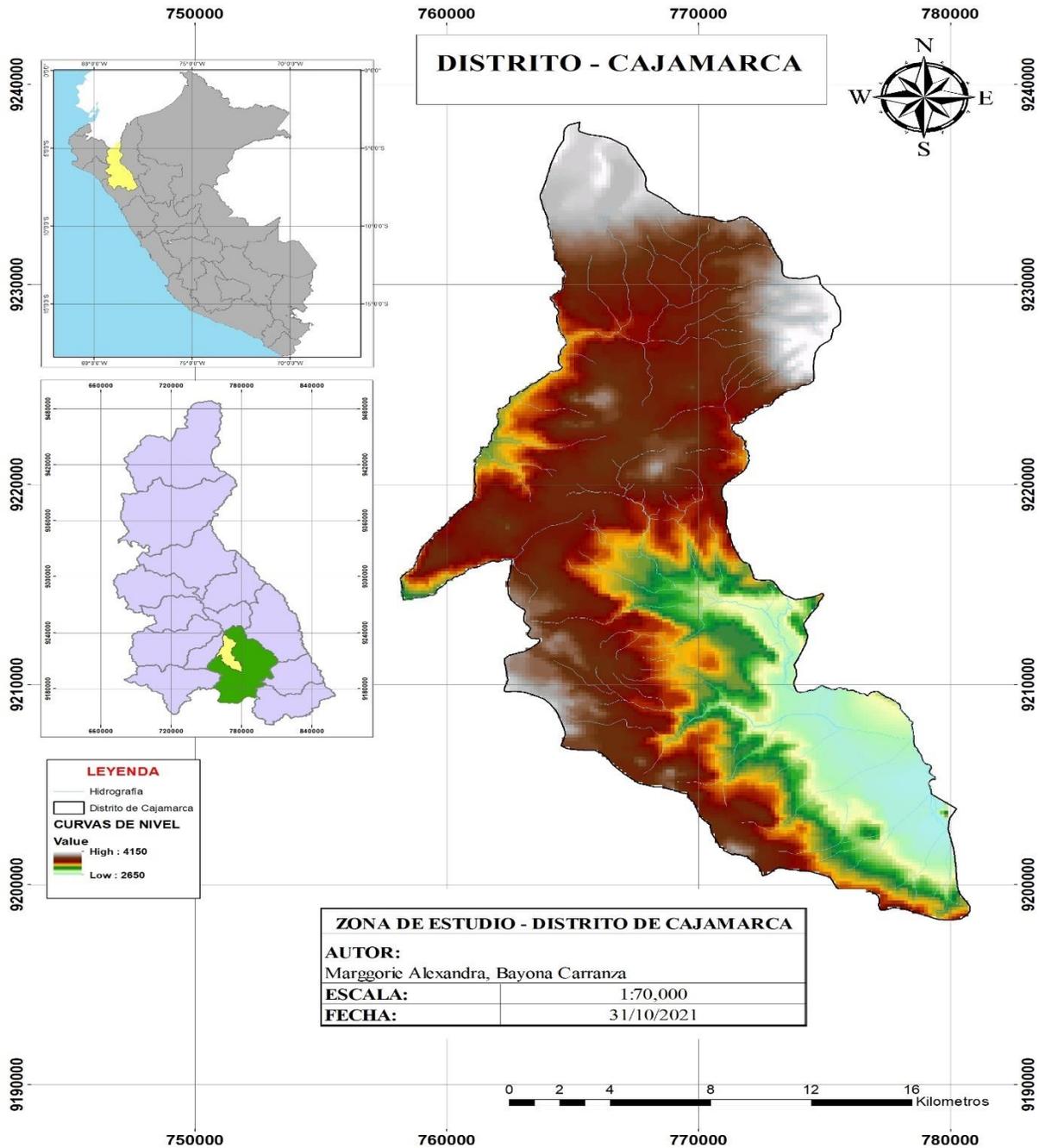
Soledad Represa, N. (2020). *Elaboración e implementación de una propuesta metodológica para la evaluación y gestión de la calidad del aire mediante el enfoque de la ciencia de datos*. Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional de la Plata.

Tena, E. D., & Hernández, A. J. (2014). *Nuestro medio ambiente: cápsulas facilitadoras para su aprendizaje en la realidad dominicana*. Santo Domingo: Centro Cultural Poveda.

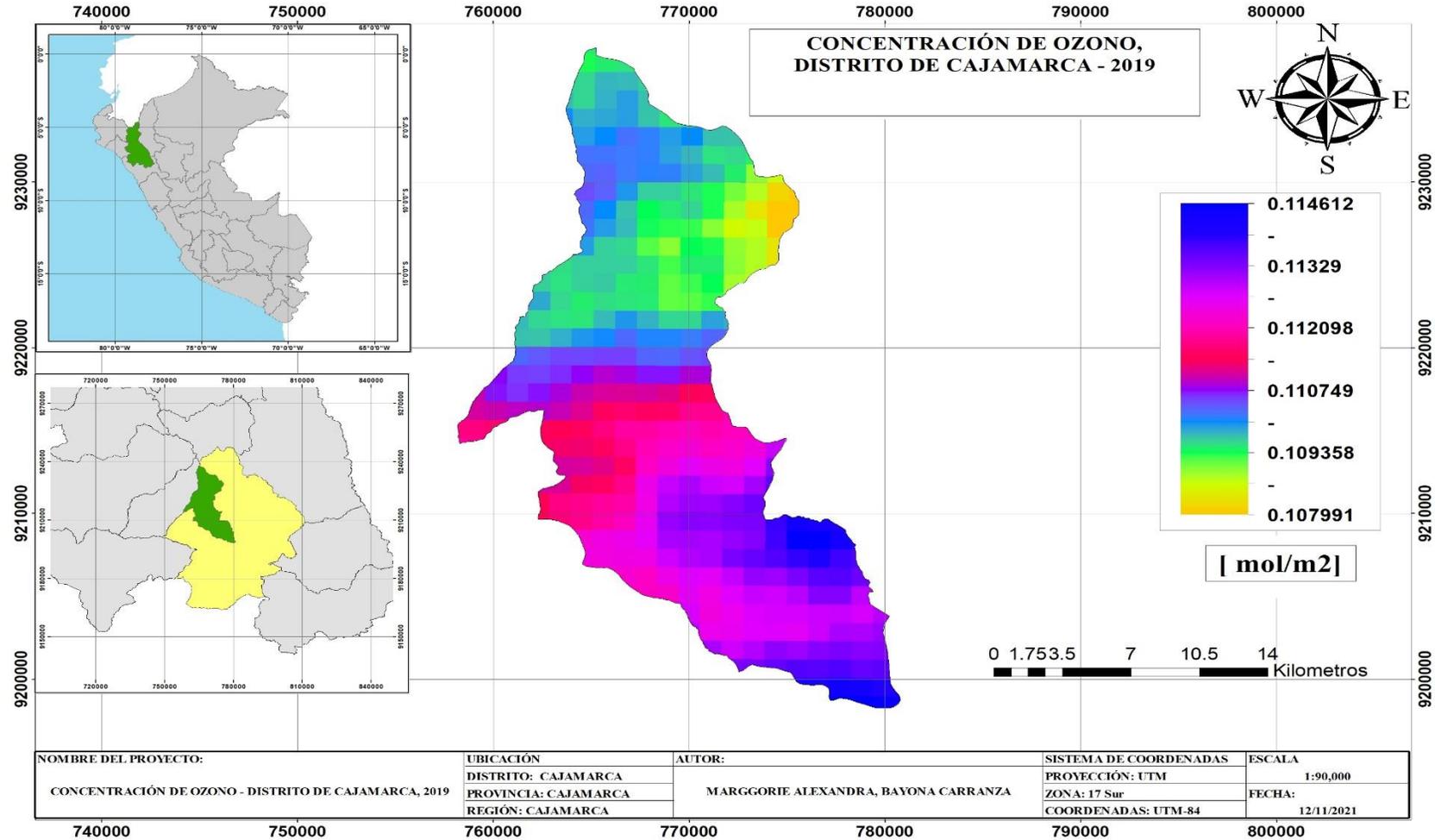
Veefkind, J.P.; Kleipool, Q. & Ludewig, A. (2017). *Early Results from TROPOMI on the Copernicus Sentinel 5 Precursor*. American Geophysical Union, Fall Meeting 2017, Abstract #A52A-08, 0(0), 1. Obtenido en <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2017AGUFM.A52A..08V/abstract>

ANEXOS

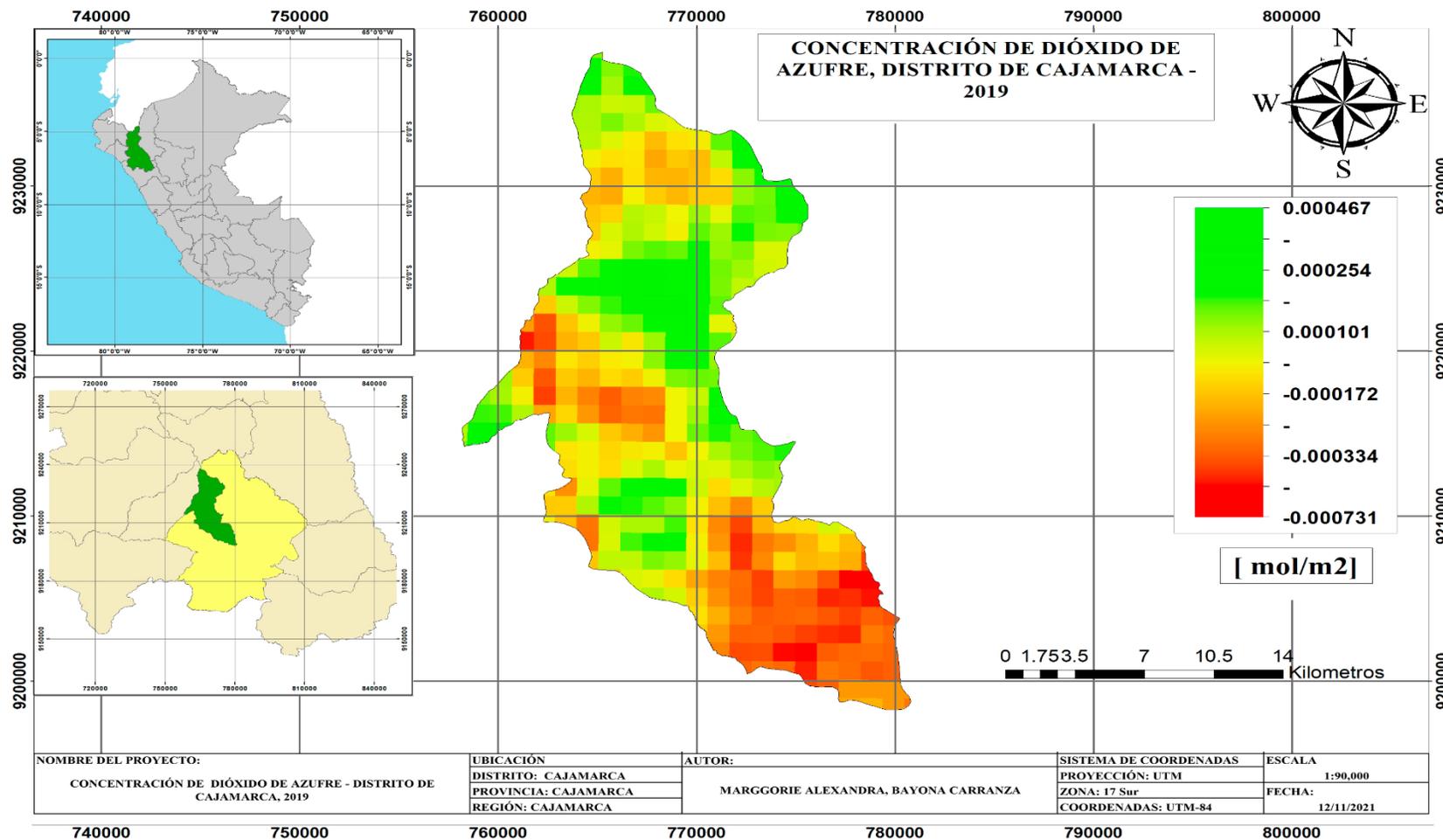
Anexo 1: Mapa de Ubicación.



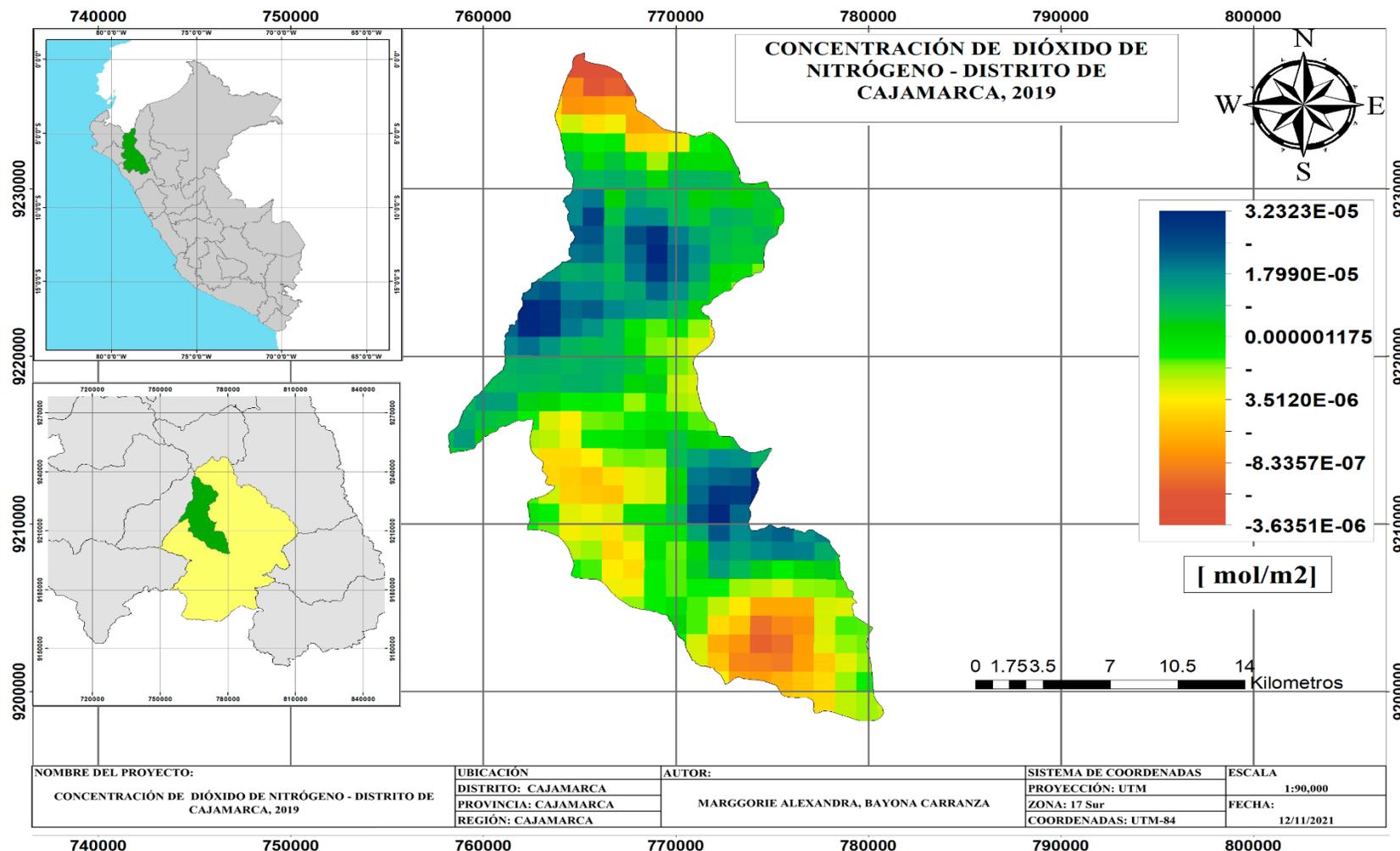
**Anexo 2:** Modelamiento de la concentración anual de Ozono, en la Ciudad de Cajamarca – 2019.



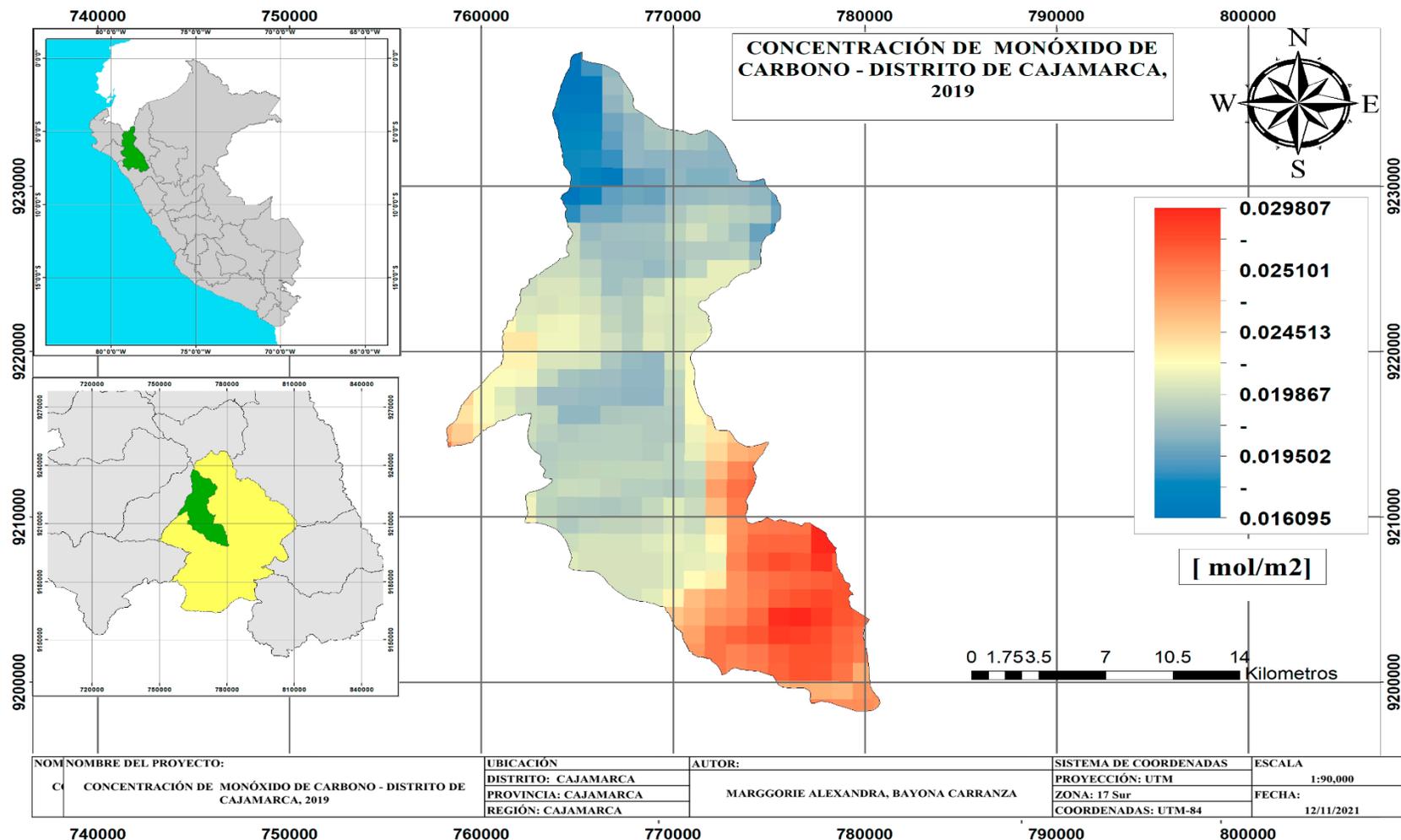
Anexo 3: Modelamiento de la concentración anual de Dióxido de Azufre, en la Ciudad de Cajamarca – 2019.



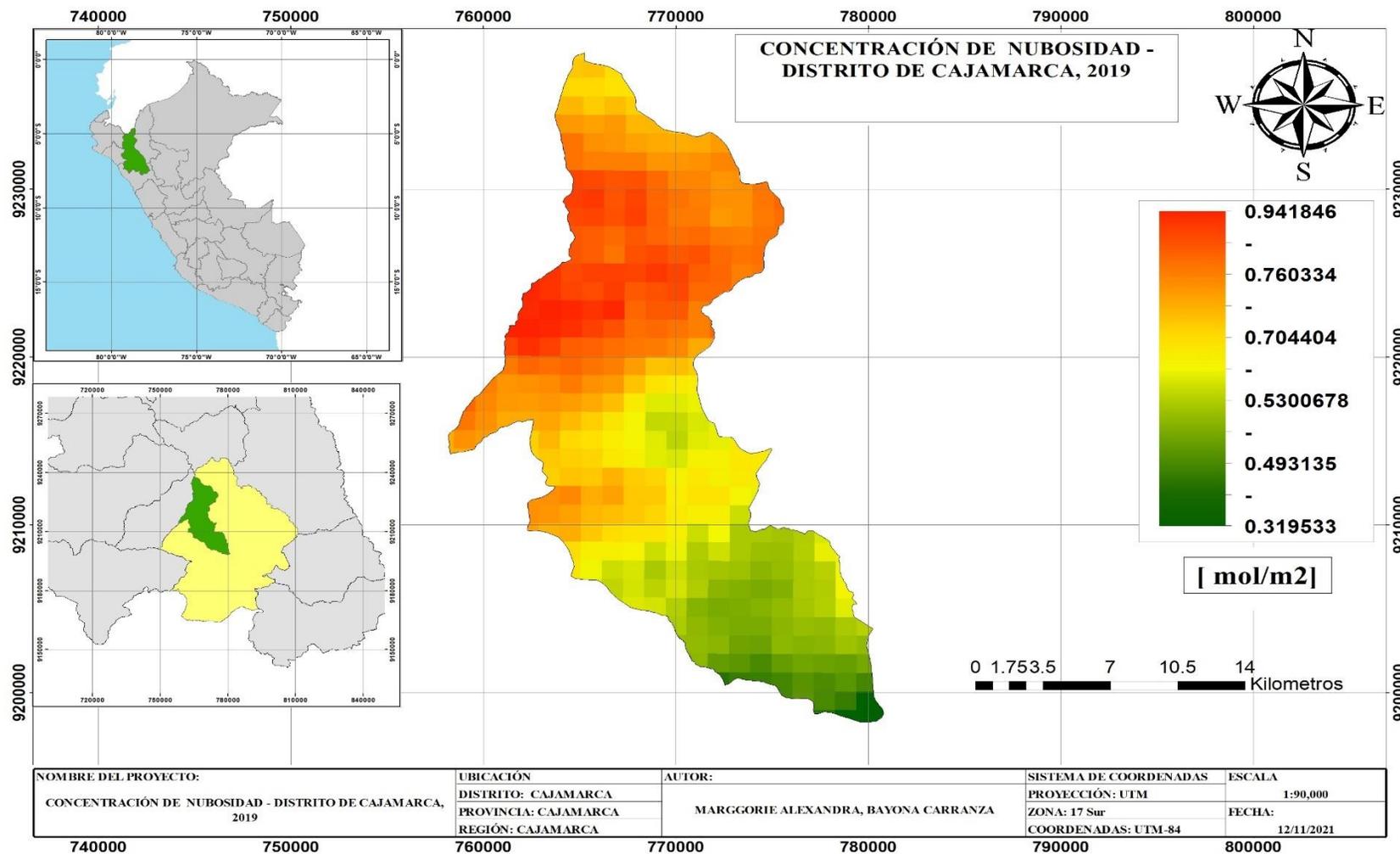
**Anexo 4:** Modelamiento de la concentración anual de Dióxido de Nitrógeno, en la Ciudad de Cajamarca – 2019.



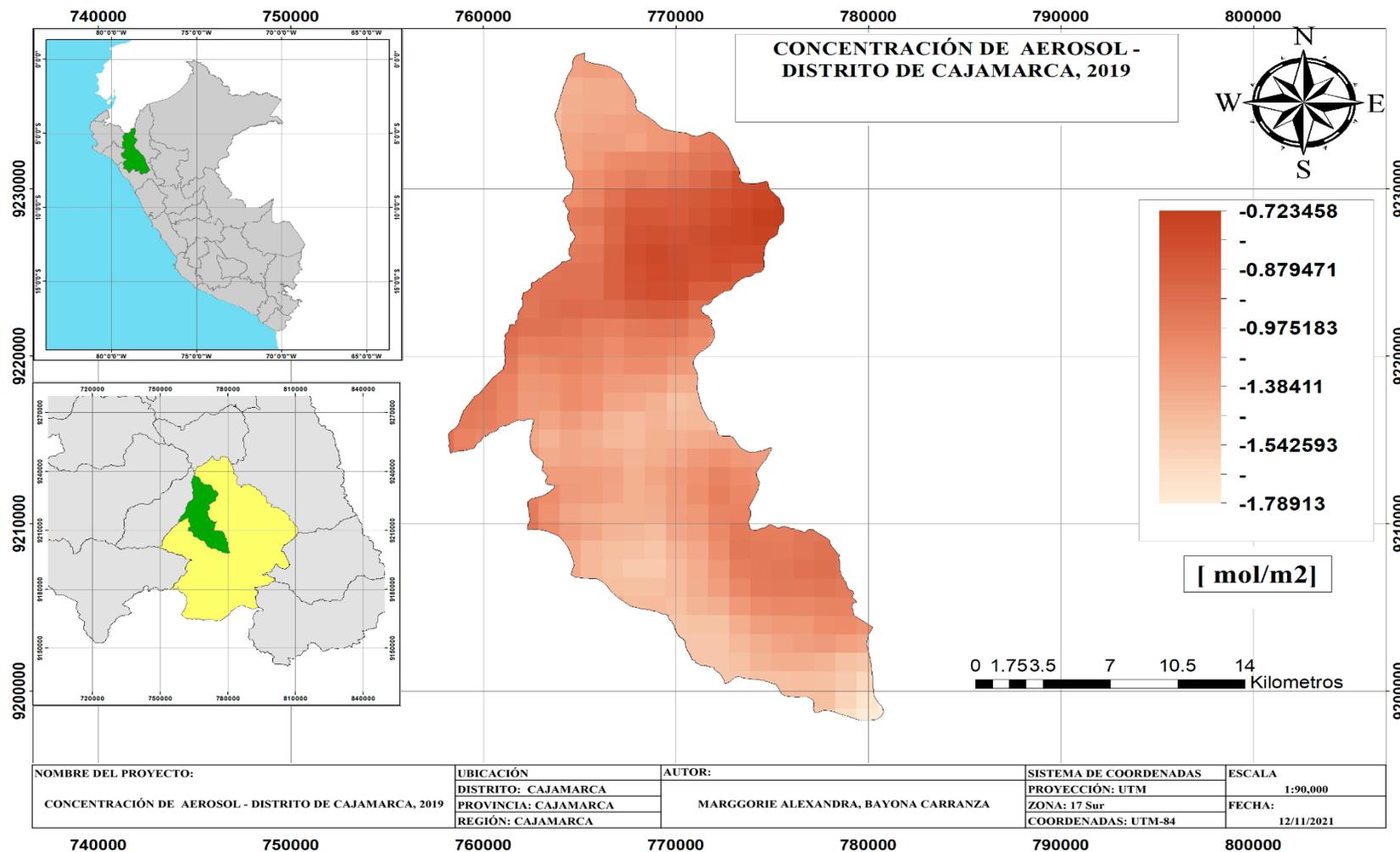
**Anexo 5: Modelamiento de la concentración anual de Monóxido de Carbono, en la Ciudad de Cajamarca – 2019.**



**Anexo 6:** Modelamiento de la concentración anual de la Nubosidad, en la Ciudad de Cajamarca – 2019.



**Anexo 7: Modelamiento de la concentración anual de Aerosol, en la Ciudad de Cajamarca – 2019.**



**Anexo 8:** Modelamiento de la concentración anual de Formaldehído, en la Ciudad de Cajamarca – 2019.

