

# ESCUELA DE POSGRADO NEWMAN

MAESTRÍA EN  
GESTION MINERAS Y AMBIENTAL



**Análisis de Contaminantes del aire atmosférico (CO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>), a través de imágenes Sentinel-5P de la región de Apurímac periodo 2018 - 2021**

**Trabajo de Investigación**

**Para optar el Grado a Nombre de la Nación de:**

Maestro en

Gestión Minera y Ambiental

**Autor:**

Bach. Solís Chipa, Virgilio

**Director:**

Mtro. Niquen Espejo, Christoper

TACNA – PERÚ

2023

“El texto final, datos, expresiones, opiniones y apreciaciones contenidas en este trabajo son de exclusiva responsabilidad del (los) autor (es)”

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>CAPITULO I: ANTECEDENTES DEL ESTUDIO.....</b>	<b>15</b>
1.1 El título del tema.....	15
1.2 Planteamiento del problema .....	15
1.3 La formulación del problema e hipótesis.....	18
1.3.1 Los objetivos y metodología .....	18
1.3.2 La justificación.....	18
1.3.3 Los alcances y limitaciones .....	22
<b>CAPITULO II: MARCO TEORICO .....</b>	<b>26</b>
2.1 La estructura del marco teórico .....	26
2.2 La Conceptualización .....	26
2.2.1 Teledetección .....	26
2.2.2 Sensores .....	26
2.2.3 Sentinel 5-P (TROPOMI) .....	27
2.2.4 Contaminantes atmosféricos .....	27
2.2.5 Monóxido de carbono (CO).....	28
2.2.6 Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ).....	29
2.2.7 Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ).....	30
2.2.8 Imagen de satélite Sentinel.....	31
2.2.9 Google Earth Engine (GEE).....	31
2.2.10 Arquitectura de Google Earth Engine .....	32
2.2.11 Series temporales.....	32

2.3	Los modelos teóricos.....	32
2.3.1	Modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos .....	32
2.3.2	Análisis de series de tiempo de los contaminantes atmosféricos .	33
2.4	Análisis comparativo.....	35
2.5	Análisis critico.....	36
<b>CAPITULO III: MARCO REFERENCIAL.....</b>		<b>37</b>
3.1	La estructura del marco referencial.....	37
3.2	La reseña histórica .....	37
3.2.1	Antecedentes del estudio .....	37
3.3	Marco legal.....	41
3.3.1	Normativa de la calidad del aire atmosférico .....	41
3.3.2	Protocolos para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire atmosférico .....	42
3.4	Métodos y materiales.....	44
3.4.1	Métodos de medición de datos de contaminantes .....	44
3.4.2	Obtención de datos.....	45
3.4.3	Metodología de procesamiento de datos TROPOMI- Sentinel-5P	46
3.4.4	Análisis de datos estadísticos .....	48
3.4.5	Series de tiempo.....	48
3.4.6	Mapas de concentración anual .....	49
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSION.....</b>		<b>51</b>

4.1 Marco metodológico (tipo y diseño de investigación, población, muestra, instrumentos) .....	51
4.1.1 Población.....	51
4.1.2 Muestra .....	51
4.1.3 Instrumentos.....	52
4.1.4 Metodología.....	53
4.2 Resultados por objetivos .....	61
4.2.1 Concentración de los contaminantes atmosféricos de los gases de CO, NO <sub>2</sub> y SO <sub>2</sub> .....	62
4.2.2 Identificación de los sectores de mayor concentración .....	64
4.2.3 Análisis de la variabilidad de las concentraciones CO, NO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> con relación al tiempo .....	67
4.3 Discusión.....	79
<b>CAPITULO V: SUGERENCIA .....</b>	<b>81</b>
5.1 Sugerencias .....	81

## ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1 Diseño metodológico .....	19
Figura 2 Croquis de ubicación de la región de Apurímac .....	23
Figura 3 Procesamiento de datos en la plataforma de (GEE) para el contaminantes (NO <sub>2</sub> ) periodo 2019 .....	47
Figura 4 Calculo de series de tiempo del contaminante (NO <sub>2</sub> ) dióxido de nitrógeno.....	49
Figura 5 Mapas de concentración del contaminante dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> ).....	50
Figura 6 Procesamiento de datos del contaminante (CO) monóxido de carbono.....	54
Figura 7 Procesamiento de datos del contaminante (CO) monóxido de carbono año 2021 .....	55
Figura 8 Procesamiento de datos del contaminante (NO <sub>2</sub> ) dióxido de nitrógeno.....	56
Figura 9 Procesamiento de datos del contaminante (NO <sub>2</sub> ) dióxido de nitrógeno.....	57
Figura 10 Procesamiento de datos contaminante (SO <sub>2</sub> ) dióxido de azufre ....	58
Figura 11 Procesamiento de datos contaminante (SO <sub>2</sub> ) dióxido de azufre ....	59
Figura 12 Procesamiento de datos en ArcGis contaminante (CO) monóxido de carbono.....	60
Figura 13 Procesamiento de datos en ArcGis contaminante (NO <sub>2</sub> ) dióxido de nitrógeno total .....	60
Figura 14 Procesamiento de datos en ArcGis contaminante (SO <sub>2</sub> ) dióxido de azufre .....	61

Figura 15 Mapas raster de datos en ArcGis del contaminante (CO) monóxido de carbono.....	62
Figura 16 Mapas raster de datos en ArcGis del contaminante (NO2) dióxido de nitrógeno total .....	63
Figura 17 Mapas raster de datos en ArcGis del contaminante (SO2) dióxido de azufre .....	64
Figura 18 Series de tiempo del contaminante (CO) monóxido de carbono periodo 2018.....	69
Figura 19 Series de tiempo del contaminante (CO) monóxido de carbono periodo 2019.....	69
Figura 20 Series de tiempo del contaminante (CO) monóxido de carbono periodo 2020.....	70
Figura 21 Series de tiempo del contaminante (CO) monóxido de carbono periodo 2021 .....	71
Figura 22 Series de tiempo del contaminante (NO2) dióxido de nitrógeno periodo 2018.....	72
Figura 23 Series de tiempo del contaminante (NO2) dióxido de nitrógeno periodo 2019.....	73
Figura 24 Series de tiempo del contaminante (NO2) dióxido de nitrógeno periodo 2020.....	74
Figura 25 Series de tiempo del contaminante (NO2) dióxido de nitrógeno periodo 2021 .....	75
Figura 26 Series de tiempo del contaminante (SO2) dióxido de azufre periodo 2018 .....	76
Figura 27 Series de tiempo del contaminante (SO2) dióxido de azufre periodo 2019 .....	77

Figura 28 Series de tiempo del contaminante (SO <sub>2</sub> ) dióxido de azufre periodo	
2020 .....	78
Figura 29 Series de tiempo del contaminante (SO <sub>2</sub> ) dióxido de azufre periodo	
2021 .....	79

## ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1 Características de satélite y sus formas de medicion.....	25
Tabla 2 Características de disponibilidad de datos de TROPOMI-Sentinel 5P. .....	46
Tabla 3 Programas y acciones.....	52

## RESUMEN

La polución de la atmosfera que se da hoy en día en muchos países, es difícil de mitigar en nuestro planeta, estos se generan debido principalmente por las actividades humanas, presentan efectos dañinos en la población y el medio que les rodea. El presente estudio tiene como objetivo determinar la contaminación del aire atmosférico a partir de imágenes Sentinel-5P, en el entorno de Google Earth Engine de la región de Apurímac en el espacio temporal de 2018-2021. La metodología utilizada es la técnica de percepción remota de aprendizaje automático a partir de datos de los sensores del satélite troposférico de Sentinel-5P. Los resultados del análisis determinan que el contaminante monóxido de carbono (CO) llega a niveles máximos de  $0.0236 - 0.0284 \text{ mol/m}^2$  en las provincias de Chincheros y Abancay correspondientes a los años 2019 y 2020, niveles bajos en el año 2018 de  $0.0136 - 0.0160 \text{ mol/m}^2$  en las provincias de Aymaraes, Antabamba y Grau, por otro lado el contaminante dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) en el periodo de simulación llegan a niveles altos de  $0.000044 - 0.000046 \text{ mol/m}^2$  en los años 2020 y 2021 en las provincias de Abancay, Cotabambas y Andahuaylas, así mismo los resultados en la simulación del contaminante atmosférico dióxido de sulfuro ( $\text{SO}_2$ ), los niveles altos se presentan los años 2020 y 2021 en las provincias de Aymaraes, Cotabambas, Grau y Antabamba valores de  $0.000161 - 0.000247 \text{ mol/m}^2$ . El estudio concluye que en los años 2020 y 2021 existe mayor contaminación que los años anteriores, para una prevención, es necesario evaluar las políticas de protección del medio ambiente, lo que requiere planteamientos sostenibles y medidas estrictas.

**Palabra clave:** Atmosfera, contaminación, google earth engine, sensores y sentinel - 5P.

## ABSTRACT

The pollution of the atmosphere that occurs today in many countries, is difficult to mitigate on our planet, these are generated mainly due to human activities, have harmful effects on the population and the environment around them. The present study aims to determine the atmospheric air pollution from Sentinel-5P images, in the Google Earth Engine environment of the Apurimac region in the temporal space of 2018-2021. The methodology used is the machine learning remote sensing technique from Sentinel-5P tropospheric satellite sensor data. The results of the analysis determine that the pollutant carbon monoxide (CO) reaches maximum levels of 0.0236 - 0.0284 mol/m<sup>2</sup> in the provinces of Chincheros and Abancay corresponding to the years 2019 and 2020, low levels in the year 2018 of 0.0136 - 0.0160 mol/m<sup>2</sup> in the provinces of Aymaraes, Antabamba and Grau, on the other hand the pollutant nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) in the simulation period reach high levels of 0.000044 - 0.000046 mol/m<sup>2</sup> in 2020 and 2021 in the provinces of Abancay, Cotabambas and Andahuaylas. Likewise, the simulation results for the air pollutant sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) show high levels in 2020 and 2021 in the provinces of Aymaraes, Cotabambas, Grau and Antabamba with values of 0.000161 - 0.000247 mol/m<sup>2</sup>. The study concludes that in the years 2020 and 2021 there is more pollution than previous years, for prevention, it is necessary to evaluate environmental protection policies, which requires sustainable approaches and strict measures.

**Keywords:** Atmosphere, pollution, google earth engine, sensors and sentinel - 5P.

## INTRODUCCIÓN

Según el estudio de polución ambiental del aire atmosférico, anunciado por el Organismo Mundial de la Salud menciona que el periodo 2016, uno de cada nueve fallecidos está directamente relacionada a la contaminación atmosférica (OMS, 2016). Por otro lado, la Organización Panamericana de la Salud (OPS, 2020), indica que “uno de los factores que debemos tener en consideración, es la calidad de aire donde viven las personas, y esto está relacionada a los fallecimientos que se dan por situaciones de vulnerabilidad por problemas relacionados a enfermedades respiratorias”.

Para Olmo et al. (2011) la contaminación atmosférica del aire, “es un problemas medioambientales que se manifiesta en los países con mayor desarrollo económico, en vías de desarrollo de desarrollo industrial (p.12). Lavaine (2014) afirma “estos son factores que crean problemas en la salud pública, desde el ámbito local, regional y nacional”. Por otra parte, el Organismo Mundial de la Salud (OMS) manifiesta que el 90% de nuestra población a nivel mundial habita en sectores contaminados, respirando aire con altos niveles de contaminación, las consecuencias a esta exposición a ambientes contaminados por estos agentes, se generan las muertes por problemas respiratorios por la inhalación de estos gases. Muchos estudios indican, que existe relación directa entre las enfermedades y la contaminación ambiental que se da en las grandes ciudades, donde el NO<sub>2</sub>, el polvo (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>), el CO, el ozono, el gas metano y otros gases crean enfermedades para la salud de la población, por ejemplo, enfermedades respiratorias (Perez et al., 2013), enfermedades cardiovasculares (Cesaroni et al., 2014), inclusive enfermedades de fertilidad (Slama et al., 2013).

El dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), “produce contaminantes secundarios como nitratos de peroxiacilo (PAN), el ácido nítrico y ozono ( $\text{O}_3$ ), que contribuyen a la formación de niebla tóxica, lluvia ácida y efecto invernadero” (Olmo et al., 2011). La contaminación por  $\text{NO}_2$  es habitual que se da a raíz de actividades humanas, estos contribuyen al calentamiento global y afectan a la salud urbana (Perez et al., 2013), ya que la población esta propenso a la incidencia del asma y otras enfermedades crónicas (Li et al., 2017). Se menciona también que es un contaminante que altera la calidad del aire, es un gas de color marrón rojizo que resulta de la conversión del NO en presencia de compuestos orgánicos volátiles. Según (Baldasano 2020) estos “se generan por la emisión de los procesos de motores de combustión, reveló que el 65% son generadas por el tráfico de vehículos y el resto 35% a otras fuentes, como el sector industrial, la actividad de las centrales eléctricas” (p.56).

Así mismo la contaminante de monóxido de carbono (CO), para (Borsdorff et al., 2018), “es un gas que está presente en el aire, es importante en ciertas áreas urbanas, las mediciones de su concentración global mejoran la comprensión de la troposfera química y transporte atmosférico de largo alcance”

Con el envío del satélite de la misión Sentinel-5P al espacio en octubre del 2017, para la toma de datos de cobertura del programa Copernicus de la ESA se dio un salto para la toma de imágenes de código abierto de uso medioambiental, sociales y económicos (Paul et al., 2012). “Los datos del instrumento TROPOMI que se utiliza para medir la contaminación troposférica, estos han sido evaluados, modelizados y validados por autores en diferentes temas medio ambientales” (Zeng et al., 2019). “Así mismo han sido calibradas para la descarga de datos paramétricos de escala global con mediciones independientes para cada contaminante, estos datos son similares a

los precedentes de sensores similares de la NASA” (Beirle et al., 2019), evaluaron la precisión de la medición espectrometría en diferentes escalas espaciales, desde el nivel local al regional y nacional, con mediciones en los espectros ultravioleta, visible, cercano e infrarrojo de onda corta que pueden aportar una información a los de datos atmosféricos, como el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), monóxido de carbono ( $\text{NO}$ ), el gas metano ( $\text{CH}_4$ ) el gas Ozono ( $\text{O}_3$ ) (Theys et al., 2019).

El objetivo del presente trabajo de investigación es construir un análisis comparativo de la presencia de los contaminantes en el aire atmosférico obtenidos de los productos de datos Sentinel-5P, a nivel de la región de Apurímac correspondiente a los periodos del 2018 al 2021 a través del entorno de Google Earth Engine (GEE), utilizando el algoritmo de JavaScript.

## **CAPITULO I: ANTECEDENTES DEL ESTUDIO**

### **1.1 El título del tema**

Análisis de Contaminantes del aire atmosférico (CO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>), a través de imágenes Sentinel-5P de la región de Apurímac periodo 2018-2021.

### **1.2 Planteamiento del problema**

La contaminación ambiental del aire atmosférico, es un problema ambiental difícil de mitigar en nuestro planeta, estos se generan debido principalmente por las actividades humanas, industriales, mineras, parques motorizados, desechos domésticos, equipos de combustión, los vehículos de transporte, los parques industriales, los incendios forestales, son fuentes directas de contaminación del aire atmosférico.

Los agentes contaminadores del aire atmosférico son cada vez más preocupantes para la salud pública en general, pueden causar daños a los pulmones, reducir los ritmos respiratorios y aumentar el riesgo de infecciones respiratorias. También puede contribuir a la formación de smog y lluvia ácida, lo que puede dañar los cultivos y la vida acuática.

Según datos de OMS, la población mundial (99%) inhala aire atmosférico que supera los rangos permisibles recomendados por este organismo, estos contienen altos niveles de contaminantes; por otro lado, estos datos indican que se presentan mayormente en los países subdesarrollados.

En nuestro país la alteración del aire de la atmosfera se da con frecuencia en las zonas mayor pobladas (urbanas), el gran contribuyente a la contaminación del aire

es el parque automotriz; manifiesta el Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA).

Según Pando (2021), “la contaminación ambiental del monóxido de carbono (CO) en nuestra capital, ha alcanzado niveles de concentración de CO hasta 2,385.93  $\mu\text{gCO}/\text{m}^3$ , el nivel más bajo de concentración 870.25  $\mu\text{gCO}/\text{m}^3$  en el año 2019”, estos resultados se han comparado con los estándares de calidad ambiental del aire (D.S. N°.003-2017- MINAM), ninguna de los resultados ha superado los 30,000  $\mu\text{gCO}/\text{m}^3$ . Por otro lado, una de las preocupaciones más importantes de la humanidad, es que los límites máximos superan los estándares de la calidad del medio ambiente, estos resultados modifican la composición del aire, el bienestar de la población y la calidez de vida de la población, dado que la presencia de estos contaminantes altera los límites permisibles del ambiente, no respetando los estratos sociales ni división social.

Según Tello et al. (2021) “los principales problemas de la contaminación ambiental del aire, son esencialmente al crecimiento de la población y la industrialización de las empresas, esta contaminación afecta seriamente a la población, asimismo afecta al medio ambiente y la salud de la personas” (p.24).

En la actualidad, existen estudios sobre la contaminación ambiental del aire atmosférico a partir de imágenes de satelitales, donde nos permite determinar la polución de gases en el aire, estos datos de satélite son de código abierto, gratuitos para estudios medioambientales, empleados por el Servicio de Monitoreo de la Atmósfera Copernicus para poder expresar pronósticos y que permita a la población a implementar políticas de mitigación ambiental.

En el año 2017, el primer satélite Copernicus Sentinel 5 Precursor (5P) fue lanzado al espacio este satélite es exclusivamente para poder monitorear la

composición atmosférica, este satélite está trazado para controlar la concentración de varios gases que se encuentran en la estratosférica, en la troposfera de nuestro planeta, este está a bordo de Sentinel 5-P. Para (Ialongo et al., 2020) “El sensor TROPOMI es un instrumento para monitoreo troposférico, puede monitorear varios contaminantes del aire debido a que tiene una resolución espacial (3:5 ×7 km) al principio de la misión y (3:5×5:5 km) a partir del año 2019”. Por otro lado, (Veeffkind et al, 2017) “Fue desarrollado por la European Space Agency ESA, es un espectrómetro de onda corta, determina las concentraciones de: monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), ozono (O<sub>3</sub>), formaldehidos y parámetros”.

Finalmente el trabajo de investigación presenta como objetivo determinar la concentración de NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> y CO en la región de Apurímac a partir de las observaciones de TROPOMI en el periodo 2018 al 2021, esta contaminación es generada por la polución de sustancias tóxicas producidas generalmente por las acciones humanas, estos gases presentes en la atmósfera producen una serie de anomalías y secuelas para el ecosistema, afectando directamente a la salud humana, mayormente a las vías respiratorias, la visibilidad de los ojos, cuando uno se expone a estos gases de sustancias tóxicas están expuestos a efectos mutagénicos o cancerígenos que ocasionan mortalidad a largo plazo, asimismo los efectos sobre los materiales que están expuestas a estas, efectos sobre la producción agrícola (óxidos de azufre), que inciden directamente en el desarrollo y crecimiento. Para reducir la emisión de contaminantes se debe elaborar planes de prevención de descontaminación para reducir en lo mínimo las emisiones, efectuar mediciones y controles periódicas para alertar a la población y tomar medidas correctivas para lograr una calidad de aire aceptables que estén dentro de los Límites Máximos Permisibles.

## **1.3 La formulación del problema e hipótesis**

### **1.3.1 Los objetivos y metodología**

#### 1.3.1.1 Objetivo general

Determinar la contaminación del aire atmosférico a partir de imágenes Sentinel-5P, en la plataforma de Google Earth Engine de la Región de Apurímac en el periodo 2018-2021.

#### 1.3.1.2 Objetivo específico

Determinar la concentración de los contaminantes atmosféricos de los gases de CO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> en la Región de Apurímac en el periodo de estudio 2018 - 2021.

Identificar los sectores de mayor concentración en la Región de Apurímac periodo 2018-2021.

Analizar la variabilidad de las concentraciones CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> con respecto al tiempo en la Región de Apurímac.

### **1.3.2 La justificación**

#### 1.3.2.1 Justificación teórica

Los estudios realizados nos indican que la contaminación del aire atmosférico es un problema que se muestra dentro la población, estas sustancias están dispersas en el aire como gases y material particulado en suspensión. La contaminación ambiental afecta a la población en la calidad de vida, generalmente al medio que nos rodea y puede poner en riesgo la salud de las personas.

### 1.3.2.2 Justificación Metodológica

#### 1.3.2.2.1 Tipo y diseño de investigación

El presente estudio es de tipo no experimental, correlacional, donde afirma, “que no se ha manipulado la variable independiente para analizar su comportamiento a la variable dependiente tal como indica” (Valderrama 2015). Por otra parte, “es una investigación no experimental porque se observa tal como se presenta en su estado natural, para luego analizar, correlacional, porque se ha medido el nivel de correlación entre las variables como manifiestan” (Barriga & Hernández, 2010).

#### 1.3.2.2.2 Metodología de investigación

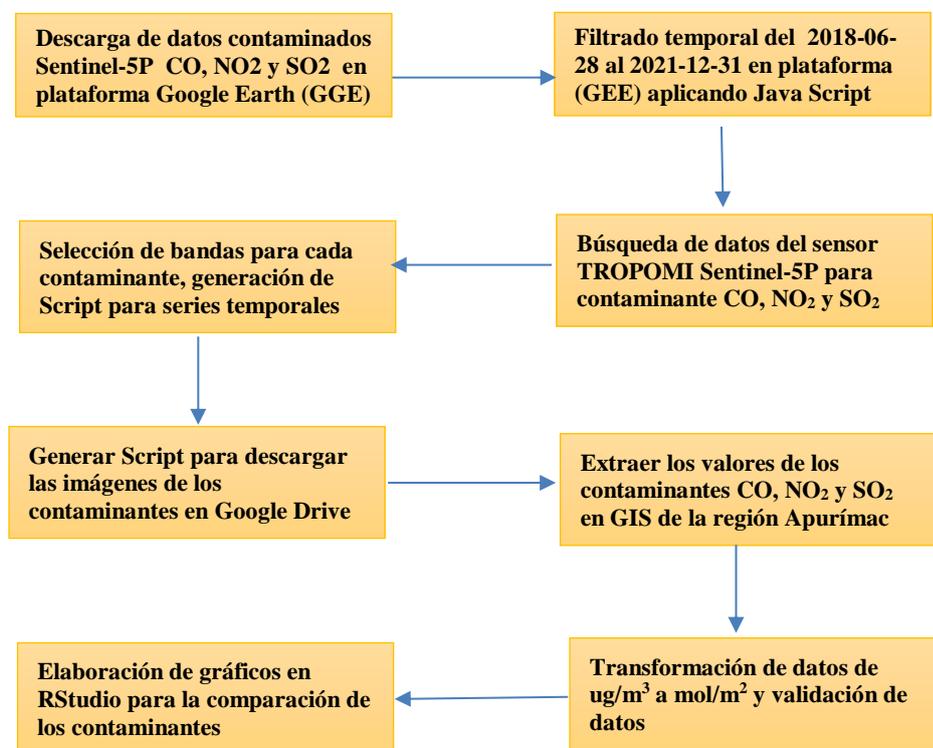
Para el presente trabajo, la metodología utilizada es el análisis e interpretación de imágenes Sentinel-5P del sensor TROPOMI, estos datos son de la NASA, cuenta con mediciones de gases presentes en la atmosfera entre ellos, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, las mediciones están disponibles en forma gratuita para el usuario. Para su procesamiento de imágenes se aplicó la técnica de percepción de aprendizaje automático dentro la plataforma Google Earth Engine (GEE), que está disponible en: <https://earthengine.google.com/>

Esta plataforma de Google Earth Engine (GEE) es gratuita online que fusiona tecnologías como el "Big Data", que trabaja con algoritmos de programación JavaScript, Python entre otros; pone a disposición en su base de datos gran número de imágenes de satélite, recientes e históricas de información de datos a escala planetaria, maniobra

algoritmos de aprendizaje automático para el monitoreo del medio ambiente. Los datos para este trabajo de investigación están disponible desde el año 2018 hasta la actualidad en el siguiente Link: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentinel-5p>

**Figura 1**

*Diseño metodológico*



### 1.3.2.3 Justificación practica

El resultado de esta investigación nos permite determinar la contaminación del aire atmosférico, para llegar a estos datos de contaminación se utiliza la aplicación de algoritmos de aprendizaje automático, procesando los datos en la nube dentro el motor de Google Earth Engine, en los algoritmos de programación JavaScript, donde los

resultados del procesamiento de datos nos mostrarán los niveles de contaminación del aire atmosférico de las concentraciones CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> en la Región de Apurímac.

#### Monóxido de carbono Sentinel-5P

Son concentraciones de monóxido de carbono (CO) combinado por vapor de agua. El CO es un gas que está presente y es muy importante para la comprensión de la química troposférica. Las fuentes principales de generación de (CO) podemos mencionar a la combustión de combustibles fósiles, las quemaduras de biomasa, la oxidación del gas metano en la atmósfera, y otros hidrocarburos.

Disponibilidad del conjunto de datos: 2018-06-28 – Actual

#### Dióxido de nitrógeno de Sentinel-5P

Está presente como concentración total, la troposférica y estratosférica. El dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) ingresa a la atmósfera del resultado de actividades antropogénicas, podemos citar a las combustiones de los combustibles fósiles, también la quema de biomasa, los procesos naturales que incluyen a los procesos microbiológicos del suelo, los incendios forestales.

Disponibilidad del conjunto de datos: 2018-06-28 - Actual

#### Dióxido de azufre de Sentinel-5P

Concentración de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en la atmósfera. El SO<sub>2</sub> entra en la atmósfera de la Tierra a través de procesos tanto naturales como antropogénicos, aunque la mayor parte es de origen antropogénico. Las

emisiones de SO<sub>2</sub> afectan negativamente a la salud de la población, a la calidad del ambiente y también tienen un efecto sobre el clima a través del forzamiento radiactivo.

Disponibilidad del conjunto de datos: 2018-07-10 – Actual

Estos resultados nos ayudarán a resolver los problemas ambientales generados por las diferentes actividades que realiza el hombre, gracias a la potencia del motor de Google Earth Engine podemos contemplar y comparar estos resultados de la contaminación con otras ciudades de todo el mundo, con estos resultados podemos realizar, programar planes de mediana y al largo plazo para mitigar el impacto de contaminación al planeta.

### **1.3.3 Los alcances y limitaciones**

#### 1.3.3.1 Limitaciones de Tiempo.

El trabajo de investigación se realizará en un periodo de tiempo prospectivo.

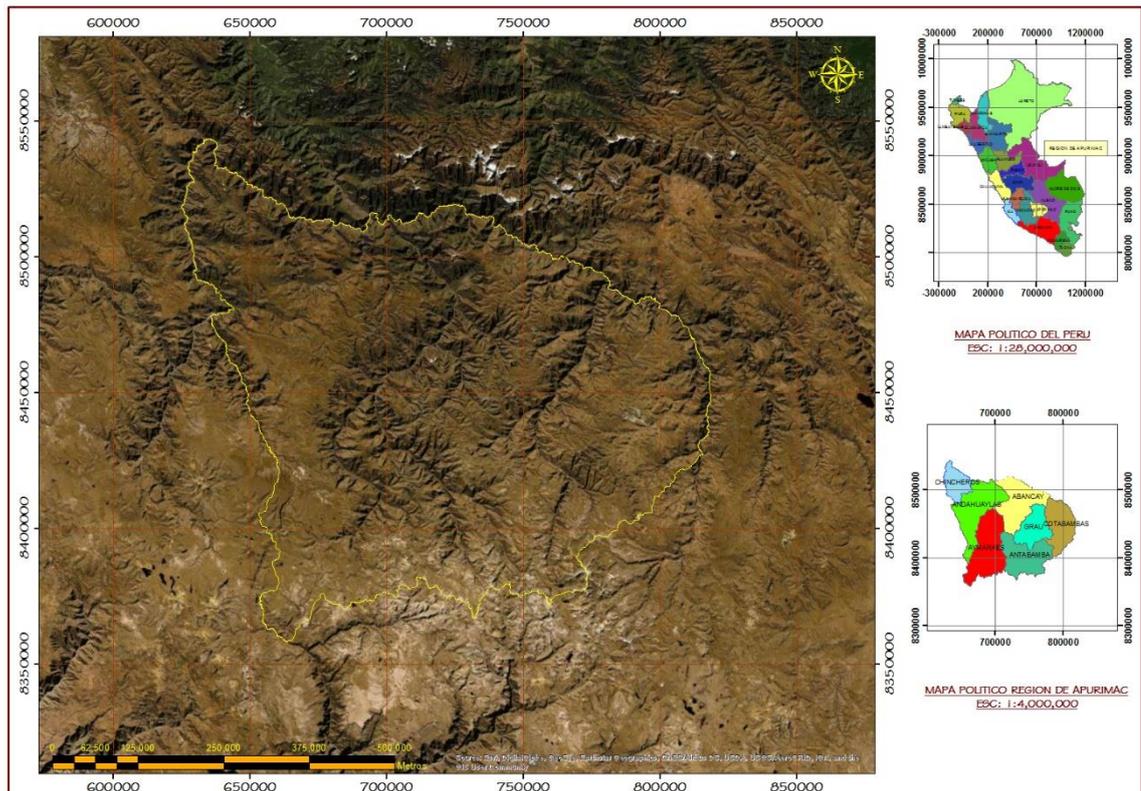
#### 1.3.3.2 Limitaciones de Espacio.

El área de estudio es el departamento de Apurímac (Figura 2), ubicada dentro de la región andina del Perú, su extensión superficial es aproximada 21 113,19 Km<sup>2</sup>. Lo referente a la vegetación de la zona, existe una diversidad de pisos ecológicos, que varían desde los pastizales de alto andinos, bosques naturales y bosques plantados por la mano del hombre, hasta una serie de formaciones de matorrales. Sin

embargo, es notoria la presencia de pastizales en un 45% de la extensión de la región de Apurímac, estos se encuentran principalmente en las zonas altas al sur de la región, principalmente en las provincias de Aymaraes, Antabamba, Grau y Cotabambas.

**Figura 2**

*Croquis de ubicación de la región de Apurímac*



*Nota.* El grafico muestra la ubicación de la región de Apurímac

### 1.3.3.3 Limitaciones de recursos

Hoy en día se tiene información en tiempo real del Índice de la calidad del aire (ICA), estos valores están disponible en: <https://aqicn.org/station/@90898/es/>, por otra parte, existen en la red Imágenes de satélite que poseen alta resolución espacial para el análisis de la calidad ambiental, están disponibles en la plataforma EOS Crop Monitoring, estos pueden verificar los cambios que ocurre en la

vegetación, adquirir datos meteorológicos en tiempo real, agenciar tareas de exploración, identificar áreas con problemas ambientales y recibir notificaciones todo en tiempo real, al utilizar esta tecnología estamos ahorrando significativamente tiempo y reduciendo el costo; para poder tomar decisiones en tiempo real. Su sistema de almacenamiento de datos de campo permite una gestión de datos que sean más eficiente y fácil, permitiendo a los usuarios el control de los posibles cambios en la salud de los cultivos en forma remota compartiendo la información con los usuarios y almacenando todos los datos para análisis para la zona de estudios medio medioambientales. Para poder realizar el trabajo mostrar con mayor precisión los agentes contaminantes de la atmosfera del aire se tiene imágenes de satélite TROPOMI, para poder realizar trabajos más precisos, identificar más características y a escalas menores se requieren imágenes de satélite que posean alta resolución espacial.

#### 1.3.3.4 Otros alcances y limitaciones

La contaminación del aire es causada por la intromisión de gases tóxicos al aire, generalmente generados por la actividad humana. Por otra parte, la contaminación por polvos en suspensión en el aire también es otro factor de alteración de la salud de los trabajadores, provocada por la inhalación de enfermedades profesionales por parte de personas expuestas a estas sustancias en estado de suspensión en el aire a través de diversas actividades que alteran el estado de salud.

### 1.3.3.5 Cronograma

El periodo de estudio de la contaminación ambiental del aire atmosférico por los contaminantes de las concentraciones CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> en la Región de Apurímac, se establece desde junio del 2018 debido a que desde esa fecha se tiene datos registrados de los contaminantes hasta en periodo del mes de diciembre del 2021. Los valores logrados de cada satélite son creados por diferentes modelos de sensor, que generan información de diferentes resoluciones espaciales, resoluciones temporales y valores de medición de cada contaminante. En la tabla 1 se muestra las características de los satélites.

**Tabla 1**

*Características de satélite Sentinel 5P*

Satélite	Contaminante	Sensor/Banda	Resolución	Resolución	Unidades
			Espacial	Temporal	
Sentinel 5P - Tropospheric Monitoring Instrument	CO	CO_column_numb	1x1 km	30 minutos	<i>mol/m<sup>2</sup></i>
		er_density			
(TROPOMI)	NO <sub>2</sub>	NO2_column_num	1x1 km	30 minutos	<i>mol/m<sup>2</sup></i>
		ber_density			
	SO <sub>2</sub>	SO2_column_numb	1x1 km	30 minutos	<i>mol/m<sup>2</sup></i>
		er_density			

Fuente: (Earth Engine Data Catalog, 2018). (NASA-Earth Data, año 2018)

## **CAPITULO II: MARCO TEORICO**

### **2.1 La estructura del marco teórico**

### **2.2 La Conceptualización**

#### **2.2.1 Teledetección**

(Chuvienco, 1996), “Es la obtención de información de objetos sin tener contacto directo con ellos, esta tecnología obtiene datos a partir de imágenes de superficie terrestre a través de la interacción energética del suelo bajo prueba con un sensor espacial”. Las técnicas de teledetección incluyen elementos de fuentes de energía, sensores, sistemas de recepción de imágenes, interpretación de la cobertura terrestre y resultados finales. En la década de 1960 se estudiaba la cobertura del suelo mediante fotografías aéreas tomadas con instrumentos aeronáuticos. En las últimas décadas, se han producido importantes avances tecnológicos en geografía, sistemas de información geográfica y teledetección, utilizando sensores de teledetección con sistemas de exploración espectral y multiespectral para recopilar información sobre la cobertura terrestre superficial que se puede medir, procesar, interpretar y recuperar. resultado final del producto.

#### **2.2.2 Sensores**

Según Pérez (2007) “los sensores remotos son Instrumentos o equipos capaces de captar las firmas espectrales y espaciales de los objetos, para la obtención de datos de imagen a partir de la energía electromagnética” (p.22).

Según Bella et al. (2008) “existen dos tipos de sensores: los sensores pasivos, y activos, los primeros captan la energía electromagnética procedente del sol este es reflejada a la superficie, y la superficie terrestre emite diferentes longitudes de onda según el tipo de suelo”. Estos sensores activos, no son dependientes de la energía electromagnética del sol, inclusive no dependen de las propiedades térmicas de la Tierra, ellos generan automáticamente su energía electromagnética, debido que el sensor transmite a la superficie de forma independientemente, interactúa con la superficie del terreno generando retro dispersión de energía hacia el sensor y se acumula energía por el receptor del sensor.

### **2.2.3 Sentinel 5-P (TROPOMI)**

El satélite Sentinel 5-P, fue enviado al espacio por primera vez de la misión de Copernicus, su propósito es cumplir monitoreos permanentes del medio ambiente, este satélite está integrado con el instrumento Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI), este sensor es de tipo multiespectral, capta la reflectancia de las longitudes de onda de los contaminantes, mide los datos de concentraciones atmosféricas del gas metano, ozono, aerosol, óxido de nitrógeno, monóxido de carbono, formaldehído, y dióxido de azufre, así también las características de las nubes. Ialongo et al., (2020), “Este sensor fue lanzado al espacio el día 13 de octubre del 2017, poseen una resolución espacial de 0,01 grados de arco  $\approx 1$  km y un intervalo de tiempo de 30 minutos”. Las unidades que se presentan para medir es mol/m<sup>2</sup>.

### **2.2.4 Contaminantes atmosféricos**

La gran parte de los contaminantes se presentan en la atmósfera cuya presencia es mayor en zona urbana, estos alteran la composición del aire atmosférico; se manifiestan debido a las fuentes antropogénicas como podemos mencionar por el

transporte urbano, por las industrias, residuos sólidos entre otros. Podemos clasificar como contaminantes primarios y secundarios. Para Ballester (2005) “los contaminantes primarios son principalmente los que se generan directamente de la fuente de emisión y los contaminantes secundarios son debido a las reacciones fisicoquímicas que actúan sobre los contaminantes primarios” (p.11).

Estos contaminantes que se generan en mayor conjunto de concentración y los más comunes es el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), monóxidos de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), ozono (O<sub>3</sub>), se presenta en la parte baja de la atmosfera, también existe el plomo (Pb), materiales particulados de diversas sustancias, como el hollín. Los compuestos orgánicos como el NO<sub>x</sub>, luego los volátiles (VOC), ozono troposférico, los aldehídos y otros se producen a partir de acciones como las reacciones químicas de los contaminantes primarios por la incidencia de la luz solar. Se tienen otros gases como el O<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, poseen una propiedad de absorber calor y retener en ellas, este fenómeno para Forero y Castro (2019) es conocido como “efecto invernadero producidas por las actividades antropogénicas han contribuido al crecimiento de estos gases, llegando a producir cambios rotundos en el clima a escala mundial, regional y local” (p.10).

### **2.2.5 Monóxido de carbono (CO)**

Para Bermejo y Buelvas (2013) el contaminante (CO) es considerado como un “Contaminante primario, este gas es producido por la combustión incompleta de los hidrocarburos, es un gas incoloro, venenoso, inodoro e insípido”(p.12).

Para Téllez et al. (2006), considera al monóxido de carbono como uno de los gases de mayor contaminación, estos están presente en la atmósfera del aire.

Las fuentes primarias de formación del contaminante, es debido a los vehículos del parque automotriz, las industrias que se tiene hoy en día, los incendios forestales ocasionados por la mano del hombre y la quema de materia orgánica por parte de los agricultores. El gas monóxido de carbono, cuando se inhala y se penetra al organismo lo que hace es desplazar al oxígeno generando la carboxihemoglobina esta causa la hipoxia en los tejidos de la piel (p.26).

Los efectos que se presentan en las personas son: cansancio, mareo, pérdida de la memoria, alucinaciones, somnolencia, genera convulsiones entre otros.

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

El gas dióxido de nitrógeno, para Alejo et al. (2011) este gas está “ligado con el óxido de nitrógeno forma parte de los llamados óxidos de nitrógeno”, generalmente se forman por la flota vehicular, las quemaduras de combustibles fósiles, así mismo se menciona que: “El dióxido de nitrógeno puede modificar a otros contaminantes atmosféricos al gas ozono y a las partículas en suspensión, así mismo contribuir a la formación de la lluvia ácida” (Gutiérrez et al., 2018).

A los óxidos de nitrógeno se lo considera como gas que genera que produce las enfermedades respiratorias en el ser humano, progresivamente puede ocasionar la disminución de la sensación olfativa, irritación de las fosas nasales, problemas respiratorios y también las edemas pulmonares (Carnicer, 2008).

El tiempo de la presencia de este contaminante en el aire atmosférico es de horas hasta días su permanencia, también se indican que: “Existe los procesos de autodepuración, esto debido a fenómenos de mezcla, transporte, transformación química o física y depósito; alterando sus características y la concentración del efluente gaseoso con el tiempo y el espacio” (Senén, et al., 2012, p.24).

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

El gas dióxido de azufre está considerado como uno de los contaminantes primarios. Las propiedades del gas como se indica que: “Poseen un olor fuerte e irritante; la densidad es mayor que del aire, poseen alta solubilidad dentro del agua, se genera a partir de quemas de combustibles fósiles, líquidos y sólidos que contienen azufre” (Núñez et al., 2019, p.12).

El tiempo de estar presente dentro de la atmósfera se generan procesos físicos de transporte y dispersión, según estudios permanecen dentro de la atmosfera entre 2 y 4 días, estas pueden ser transportados desde el punto de generación hasta de 100 km de distancia. Por otra parte, para Sin (2014) “durante el tiempo de exposición, se convierte en ácido al reaccionar con el vapor de agua de la atmósfera generando la niebla o lluvia ácida causando necrosis foliar en la vegetación y deterioro de los suelos” (p.15).

El dióxido de azufre para Alvarado (2006) “afecta en forma directa al sistema circulatorio y respiratorio, causando en ellas: paros cardíacos, edemas pulmonares, queratitis, inflamación de las vías respiratorias, entre otros” ( p.23).

### **2.2.8 Imagen de satélite Sentinel 2A**

Este satélite Sentinel 2A es de origen europeo forma parte de las misiones de ESA, que forma parte de su presentación espacial de Copernicus. Estos satélites se enviaron a la órbita del espacio desde el periodo 2015 y su gemelo en el periodo 2016 el Sentinel 2B, ambos ruedan en el mismo eje, tienen un desfase en ángulo de 180°, entregando una alta periodicidad de revisita del lugar. Los satélites Sentinel-2 MultiSpectral están disponible para su descarga en diferentes plataformas, las imágenes de los instrumentos (MSI) simbolizan un nuevo propósito para obtener información de la superficie terrestre con escalas planetarias más consistente, especialmente las zonas más confusas, con alto grado de fragmentación, deforestación de la cobertura terrestre, pastoreos intensivos de parcelas agrícolas, en el monitoreo y control de glaciares, control de las zonas urbanas. Para (Drusch et al., 2012), “el satélite posee 12 Bandas espectrales Sentinel-2 MSI con resolución espacial de (10 m, 20 m y 60 m)” (p.15).

### **2.2.9 Google Earth Engine (GEE)**

La plataforma del Google Earth Engine (GEE), es una herramienta que posee datos a nivel planetario, se aplica para los estudios medioambientales, en su base de datos acumula imágenes de más de 40 años atrás, del mundo entre actuales e históricas, Para Google (2016) el GEE “brinda herramientas computacionales para analizar, extraer información de este enorme almacén de datos y procesar en su plataforma con lenguaje computacional JavaScript, Python entre otros, sus aplicaciones son los cambios de la cubierta terrestre”. Por otro parte el “GEE es una “tecnología de procesamiento masivo y de alto rendimiento para los datos geoespaciales, asimismo hospeda una copia de todo el catálogo de imágenes Landsat y otras imágenes” (Venturino et al., 2014, p.43).

### **2.2.10 Arquitectura de Google Earth Engine**

Para Verma et al. (2015) manifiesta que “ Google Earth Engine está construido sobre una colección de tecnologías que están disponibles dentro del entorno de datos de Google, incluido el sistema de gestión de clúster Borg”. Asimismo, se afirma que “distribuyeron bases de datos como la de Colossus; el sucesor del sistema de archivos de Google” (Ghemawat et al., 2003); el “marco FlumeJava para la ejecución paralela de tuberías” (Chambers et al., 2010, p.26). La plataforma de Google Earth Engine similarmente interactúa con Google Fusión Tables, estos son una base de datos apoyadas en la web que acepta datos tipo vectorial (puntos, líneas y polígonos) cada uno con sus respectivos atributos.

### **2.2.11 Series temporales**

Las series temporales para Ihaka (2005) es un “conjunto de observaciones de datos  $xt$ , de las cuales se registra en un tiempo específico  $t$  (Grandell), surgen como registros de procesos que varían a lo largo del tiempo, puede ser continuo o un conjunto de observaciones discretas” (p.9), por consiguiente, las series temporales se puede precisar a todo el conjunto de observaciones (variable) en función al tiempo.

## **2.3 Los modelos teóricos**

### **2.3.1 Modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos**

Los contaminantes del aire atmosférico que se presenta son emisiones por fuentes puntuales, fuentes naturales y fuentes móviles, estos contaminantes son transportados y dispersados al medio ambiente y están sujetos a las condiciones topográficas y meteorológicas.

Con relación a las situaciones meteorológicas, dentro de la atmósfera de la tierra es el lugar en el que se depositan los contaminantes; debido a la dispersión y el transporte estos contaminantes, dependen de los parámetros meteorológicos, podemos indicar al viento, la humedad, la precipitación, la temperatura, la radiación solar, la presión atmosférica, la estabilidad atmosférica y la inversión térmica.

Por otro lado Venegas y Mazzeo (2012) indican que “el viento favorece al desplazamiento de contaminantes de un lugar a otro, ya que actúa desplazándolos y difundiéndolos a través de masas de aire; a mayor velocidad del aire, mayor será el transporte de contaminantes, y la dilución atmosférica” (p.8).

Lo relacionado a la superficie terrestre, estos actúan en el calentamiento del suelo y del aire que los rodea. Por lo tanto, la superficie topográficos influyen en la atmósfera en dos formas, primero térmicamente, a través del calor, y por los esfuerzos cortantes que se forman. Por otra parte, los sectores urbanos presentan accidentes topográficos producidos por el hombre, con características térmicas variantes por la presencia de estructuras hechos por la mano del hombre por ejemplo las construcciones de edificios, por su altitud acumulan y retienen el calor de manera más segura que el suelo, la vegetación de zonas verdes también altera el flujo del aire.

### **2.3.2 Análisis de series de tiempo de los contaminantes atmosféricos**

Para Moreno (2008), las “series de tiempo son una secuencia de variables aleatorias ordenadas de acuerdo a una unidad de tiempo, cuyas variaciones pueden ser clasificadas como sistemática cuando ocurren con regularidad, se pueden modelar; o como aleatorias”. Para Bermejo (2011), existen varias metodologías

estadísticas para poder analizar las series de tiempo adecuadamente, las más conocidas de estos modelos son:

Modelos no lineales para series temporales.

Modelos autorregresivos exponenciales de amplitud dependiente (EXPAR).

Modelos de heterocedasticidad condicional (ARCH).

Modelos lineales para el análisis de series de tiempo.

Modelo de Regresión Lineal Múltiple (MRLM) y los modelos de promedios móviles integrados autorregresivos (ARIMA).

#### 2.3.2.1 Modelos ARIMA

Los saberes sobre las series de tiempo establecen como una herramienta muy esencial para los estudios de fenómenos muy complejos como es la contaminación atmosférica. Dentro esta metodología planteada, los modelos Arima estan integrados de medias móviles (ARIMA) se acentúan por tener un extenso desarrollo, únicamente para los análisis estadísticos de las series de tiempo para los contaminantes de la atmosfera.

Estos “modelos autorregresivos integrados de medias móviles (ARIMA) realizan la predicción asumiendo que la estructura del modelo permanece sin variar en el tiempo, es decir, que en el tiempo el modelo sigue siendo apropiado para modelizar la serie” (Quesada, 2011, p.15).

## 2.4 Análisis comparativo

Tabla de análisis comparativo

VARIABLES	DEFINICIÓN	DIMENSIONES	INSTRUMENTOS
Independiente.  Análisis de Contaminantes del aire atmosférico (CO, NO <sub>2</sub> y SO <sub>2</sub> )	La contaminación atmosférica, es un problema muy preocupante en los últimos tiempos debido al incremento de los diversos gases provenientes de la industrialización y de la quema de combustibles fósiles, estas son las causas por el cambio climático.	Concentración de los contaminantes en la Atmósfera de CO, NO <sub>2</sub> y SO <sub>2</sub>  Variabilidad de las concentraciones CO, SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , con relación al tiempo.	Plataforma de procesamiento Google Earth Engine (GEE).  Algoritmo de aplicación JavaScript.
Dependiente.  Imágenes Sentinel-5P (TROPOMI)	Son Imagen de satélite, se utiliza para monitorizar gases como gas metano, ozono, los formaldehído, el aerosol, CO, NO <sub>2</sub> y SO <sub>2</sub> en la atmósfera (ESA-2020), proporciona observaciones exactas y precisas de especies atmosféricas para tener referencias sobre la calidad del aire, sobre el	Resolución temporal de Imágenes Sentinel-5P (TROPOMI).  Resolución espacial de Imágenes Sentinel-5P (TROPOMI).	Sensor de toma cada 30 minutos $\left(\frac{mol}{m^2}\right)$  Resolución (1 x 1) km.

	clima y la capa de ozono con datos globales diarias para monitorear las concentraciones de los componentes atmosféricos.		
--	---	--	--

## 2.5 Análisis crítico

Tras haber descrito el marco teórico, la metodología que va a aplicar se va a diagnosticar a los contaminantes del aire atmosférico, que estos afectan gravemente a la calidad del aire que respiramos y estos pueden generar problemas respiratorios. Estos gases se esparcen a la atmósfera debido principalmente a los procesos industriales, podemos mencionar a las plumas volcánicas, este monitoreo de la propagación de las plumas volcánicas es crítico para la seguridad de las aeronaves.

Los datos de Copernicus Sentinel-5P se presenta en tiempo real sobre los agentes de dióxido de azufre y los aerosoles que se adquiere de los datos son utilizando por el Servicio de control de aviación y en también en el Sistema europeo de información para el control de desastres naturales para aviación.

Las últimas publicaciones de los datos también se incluyen al formaldehído, que trata de ingresar a la atmósfera generados por los incendios forestales provocados por la mano del hombre y la extracción de la madera, por ejemplo. Es un importante gas que intermedia en la oxidación del metano y otros hidrocarburos. Su permanencia en la atmosfera es de corta duración, reaccionan químicamente para convertirse en un gas de monóxido de carbono, que es otro gas muy dañino y contaminante.

## **CAPITULO III: MARCO REFERENCIAL**

### **3.1 La estructura del marco referencial**

En la estructura del marco referencial se plasmará la información que permita establecer información valiosa para el trabajo de investigación, donde se efectuará un retrato general de los antecedentes del proyecto, los trabajos relacionados con el tema de contaminación del aire atmosférico, el marco legal, los materiales y métodos para el procesamiento de datos TROPOMI Sentinel-5P.

### **3.2 La reseña histórica**

#### **3.2.1 Antecedentes del estudio**

Según Gualteros et al. (2020) en su estudio de “Monitoreo de CO usando sentinel-5P y GEE: caso Cundinamarca en tiempos de COVID-19” , donde menciona.

En la composición del monóxido de carbono (CO) indica que el aire que respiraran la población del departamento de Cundinamarca (Colombia) en los primeros 6 meses de los años 2019 y 2020, analizados con el sensor Tropomi de Sentinel 5P – Nivel 2, se generaron datos mensuales de CO, con la ayuda de Google Earth Engine, estos resultados indican una diferenciación para los meses de marzo a abril, dejan ver la necesidad de fortalecer la normatividad en temas de calidad del aire en un país cada vez más agobiado por la contaminación atmosférica. Se evidencia la presencia de monóxido de carbono en los meses de marzo (68%) y abril (45%), lo que coincide con la época de mayores restricciones en el aislamiento obligatorio, cosa que no ocurre con los meses mayo y junio (p.45).

El gobierno nacional ordena una reapertura gradual de las actividades no esenciales y con ello los agentes contaminantes nuevamente aumentan en la atmosfera alcanzando mayores emisiones hasta en un 20%.

Por otra parte Opio et al. (2021) indica que los componentes atmosféricos del dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y el monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) están presentes en la contaminación atmosférica y al cambio climático.

En muchos países no se tiene reporte y control ambiental por la falta de observaciones terrestres y aéreas y estos estudios se han limitado durante mucho tiempo. Hoy en día se tiene plataformas de observación mediante satélite, como fuente alternativa de obtención de datos para estudiar la contaminación del medio ambiente. Por esta razón se presenta datos en la región de África Oriental, los instrumentos utilizados fueron el Instrumento de Vigilancia del Ozono (OMI), la Sonda Atmosférica Infrarroja (AIRS) y el Instrumento de Monitoreo Troposférico (TROPOMI). En este trabajo se ha realizó una investigación de las tendencias de las series de tiempo de datos de 2005 a 2020 mediante la prueba secuencial de Mann-Kendall y el coeficiente de correlación de Pearson, para comparar los registros de datos de los instrumentos. Este análisis demostró una tendencia en el  $\text{NO}_2$  ( $p > 0,05$ ), una tendencia decreciente en el  $\text{SO}_2$  ( $p < 0,05$ ), una tendencia decreciente ( $p < 0,05$ ) en el  $\text{CO}$  más cerca de la superficie (850 hPa a 500 hPa) y una tendencia creciente ( $p < 0,05$ ) en el  $\text{CO}$  más arriba en la atmósfera (400 hPa a 1 hPa). Es probable que haya un ascenso vertical del  $\text{CO}$ . La correlación entre los registros de los instrumentos fue de 0,54 y 0,77 para el  $\text{NO}_2$  y el  $\text{CO}$ , respectivamente.

En su estudio Forero Castro (2019) presenta una comparación entre los productos (CO, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>) obtenidos del satélite Sentinel-5P con su instrumento TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) y las estaciones terrestres de la ciudad de Bogotá (Colombia) sobre la calidad del aire.

Estas mediciones realizadas por el instrumento TROPOMI, se comparan con los datos de las estaciones terrestres durante el periodo comprendido entre agosto del 2018 a agosto del 2019, donde se analiza la influencia de variables climáticas y meteorológicas, según el análisis estadístico y observaciones espaciales, se observa semejanza en los comportamientos de las series de tiempo de las variables de estudio entre los datos obtenidos de satelitales y datos terrestres. Así mismo los mapas elaborados presentan características espacio-temporales, de las zonas de mayor contaminación, las tendencias de las concentraciones y la dinámica de las emisiones por fuentes fijas una vez validadas las observaciones de TROPOMI contra observaciones terrestres. Los resultados proporcionan una aproximación para su utilización en el monitoreo de calidad del aire en la ciudad de Bogotá, así mismo para monitorear los niveles de contaminación en sitios urbanos y rurales. Las concentraciones promedio anual de CO y NO<sub>2</sub> en el área urbana de la ciudad de Bogotá están presentes en el rango de 555-1392 *ug/m<sup>3</sup>* de CO y 22-55 *ug/m<sup>3</sup>* para el NO<sub>2</sub>, también se visualiza concentraciones anuales de NO<sub>2</sub> altas en las estaciones de Carvajal, Kennedy, Puente Aranda y Ferias que hacen de las estaciones con los índices altos de concentración de CO y NO<sub>2</sub> en la ciudad de Bogotá. Por otra parte, utilizando las observaciones de TROPOMI, se encuentra que el valor medio anual máximo de CO 48 *ug/m<sup>3</sup>*, esto se registra la estación de Fontibón, mientras que la concentración más baja de CO se presenta en la estación Centro de alto rendimiento con 43 *ug/m<sup>3</sup>*. (p.20–26).

Para corroborar este trabajo los estudios realizados (Virghileanu et al., 2020), el dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) es uno de los contaminantes principales de la calidad del aire atmosférico que se presenta mayormente en las zonas urbanas y industriales de todo el mundo.

Tomando como referencia la región Europea, en los años del 2017, casi en 20 países superaron los valores límite máximos permisibles anuales de  $\text{NO}_2$  establecidas por la Directiva de la Comisión Europea. En tal sentido el control y la regulación de la contaminación por  $\text{NO}_2$  que afecta a la humanidad, es una tarea primordial para ayudar a los responsables de la toma de decisiones y buscar una solución sostenible para la mejora de la calidad ambiental y del estado de salud de la población. En este estudio, proponemos un análisis comparativo de la columna de  $\text{NO}_2$  troposférico en Europa entre periodos de 2019 y 2020, tomando datos de la ESA Copernicus Sentinel-5P. Estos resultados muestran la contaminación por  $\text{NO}_2$  durante la aparición del COVID-19, donde se muestra una disminución en poco tiempo de las intensidades de las trazas y de las actividades industriales, revelando notables disminuciones de la densidad numérica de la columna de  $\text{NO}_2$  en la troposfera, incluso del 85% en algunas de las grandes ciudades europeas. La validación de los datos obtenidos por satélite, basado en un análisis de correlación cruzada proporcionó valores alentadores de los coeficientes de correlación (R), que oscilan entre 0,5 y 0,75 en diferentes lugares.

La notable disminución de la contaminación por  $\text{NO}_2$  sobre Europa durante el cierre de COVID-19 se pone de manifiesto que los productos Sentinel-5P son esenciales para el rastreo del aire atmosférico.

### **3.3 Marco legal**

#### **3.3.1 Normativa de la calidad del aire atmosférico**

La normativa vigente para la calidad del aire, es un conjunto de instrumentos de gestión para tener en cuenta la calidad del aire, estas normas establecidas cuando se aplica controlan de alguna forma la contaminación del aire que nos rodea, para su cumplimiento en la Política Ambiental. Estas normativas se han elaborado con la finalidad de hacer cumplir las acciones de estratégicas de carácter institucionales dentro del marco de la Ley General del Ambiente, las sugerencias planteadas de los Instrumentos técnicos normativos estarán relacionados por: a) Instrumentos técnicos: protocolo, guías, planes, folletos, manuales, y otros similares; b) Instrumentos normativos: Estándares de la Calidad Ambiental y los Límites Máximos Permisibles y algunas modificaciones; que serán ejecutados por las entidades del estado, como herramientas para la prevención de control, fiscalización y la mitigación de riesgos ocasionados a la salud pública y medio ambiente.

Las normativas de la calidad del aire a nivel local y nacional están sujetos a las siguientes leyes y resoluciones descritas a continuación:

- ❖ D.S. N° 074 – 2001 - PCM “Reglamento de Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire”.
- ❖ D.S. N° 009 – 2003 - SA “Aprueban el Reglamento de los Niveles de Estados de Alerta Nacionales para Contaminantes del Aire”.
- ❖ D.S. N° 003 – 2008 - MINAM “Estándares de Calidad Ambiental de Aire”.
- ❖ D.S. N° 006 - 2013-MINAM y sus disposiciones complementarias para diligencia de los ECA de la Calidad del Aire.
- ❖ D.S. N° 003 – 2014 - MINAM “Directiva de adecuación a nuevos ECA”.

- ❖ D.S. N° 003 - 2017- MINAM Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen las Disposiciones Complementarias.
- ❖ D.S. N° 010 - 2019. MINAM “Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire”.
- ❖ R.M. N° 181 – 2016 - MINAM. Índice de Calidad del Aire.

### **3.3.2 Protocolos para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire atmosférico**

El decreto Supremo N° 010 -2019-: MINAM aprueba los protocolos para su aplicación a nivel general para el monitoreo de la calidad ambiental del aire en nuestro país, para dicho efecto el Ministerio del Ambiente ha establecido el "Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire, que permite normalizar los argumentos técnicos para el análisis y el monitoreo ambiental del aire, con la misión de obtener resultados confiables de calidad.

El año 2001, se establece el Decreto Supremo N° 074-2001-PCM, esta se aprueba por primera vez en nuestro país Los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire. Esta normativa establece los valores ECA para seis parámetros, a continuación, se detalla:

- ❖ Material particulado menor a 10 micras (PM<sub>10</sub>).
- ❖ Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>).
- ❖ Monóxido de carbono (CO).
- ❖ Óxido de azufre (SO<sub>2</sub>).
- ❖ Plomo (Pb) en PM<sub>10</sub>.
- ❖ Ozono (O<sub>3</sub>).

Seguidamente, en el periodo 2003 y 2013, se aprobaron otras 3 normas complementarias “ (i) el Decreto Supremo N° 069-2003-PCM, que establece un valor anual para el plomo (Pb) en PM<sub>10</sub> ; (ii) el Decreto Supremo N° 003-2008 - MINAM, que fijó nuevos valores para el parámetro dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), así como parámetros adicionales y, (iii) el Decreto Supremo N° 006-2013 -MINAM”, con el que se programaron disposiciones complementarias para la aplicación de los ECA para Aire.

El año 2017, con la finalidad de actualizar y agrupar las normativas relacionados al ECA para el Aire, se dio el “Decreto Supremo N° 003-2017- MINAM, con este decreto se normaliza los ECA para Aire, perseverando 10 parámetros”:

- ❖ Material particulado con menor a 10 micras (PM<sub>10</sub>).
- ❖ Material particulado con menor a 2,5 micras (PM<sub>2.5</sub>).
- ❖ Monóxido de carbono (CO).
- ❖ Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>).
- ❖ Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).
- ❖ Ozono (O).
- ❖ Plomo (Pb) en PM<sub>10</sub>.
- ❖ Benceno (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>).
- ❖ Mercurio Gaseoso Total (MGT).
- ❖ Sulfuro de Hidrógeno (H<sub>2</sub>S).

### **3.4 Métodos y materiales**

#### **3.4.1 Métodos de medición de datos de contaminantes**

Para la medición de los datos de contaminantes del aire atmosférico, se establecen dos métodos de medición, el primero se refiere a las estaciones meteorológicas distribuidas a nivel terrestre donde toman datos de mediciones y monitoreo terrestre y la tecnología de la teledetección satelital.

##### **3.4.1.1 Redes de monitoreo terrestre**

Para Abad (2017) las redes de monitoreo terrestre “es un conjunto de estaciones de muestreo que están establecidas fijas y continuas, estas generan mediciones de contaminantes atmosféricos como: monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, ozono, material particulado (PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>) y datos meteorológicos” (p.56). Para Cobo et. al. (2016) “las redes de monitoreo se ubican de acuerdo a la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US- EPA), en base a los siguientes criterios: los contaminantes analizados, métodos de monitoreo, escala de representación espacial y criterios de emplazamiento” (p.45).

##### **3.4.1.2 Teledetección Satelital**

Este sistema de observación de datos, consiste en obtener información de la superficie terrestre sin tener contacto directo con ellas, mediante sensores instalados en las plataformas espaciales. Para Chuvieco (1996) la teledetección tiene “dos tipos de recopilar información: pasiva el sensor capta la radiación emitida o reflejada por

el objeto estudiado debido a la radiación del sol, la activa el sensor emite la radiación necesaria la cual es reflejada por el objeto” (p.68).

### **3.4.2 Obtención de datos**

Para la obtención de datos de imágenes de satélite Sentinel 5P de la ESA, se tiene diversas plataformas como Copernicus Open Access Hub, donde se tiene compatibilidad con el software SNAP el cual permite procesar y analizar imágenes en forma directa, la plataforma de Google Earth Engine (GEE). Así mismo “está basada en la nube, permite a los usuarios visualizar y analizar imágenes en forma online gratuita que trabaja con lenguaje de programación JavaScript; pone a disposición gran cantidad de imágenes actuales e históricas” (Gorelick et al., 2017). Los datos “poseen gran capacidad de análisis mediante algoritmos de aprendizaje automático para el monitoreo ambiental, para monitorear y medir los cambios que sufre el medio ambiente, para los desastres naturales futuros y evitar degradaciones forestales, contaminaciones entre otros” (Ruiz, 2017, p.68).

Los científicos e investigadores del mundo, para hacer nuevas investigaciones referente al medio ambiente utilizan la plataforma de (GEE) para realizar estudios de contaminación al medio ambiente, anunciar brotes de enfermedades nuevas, encargarse sobre los recursos naturales, entre otros, para la descarga de la información de datos se ha utilizado la plataforma de (GEE), se ha utilizado el lenguaje de programación JavaScript para la obtención de la información por periodos del sensor TROPOMI a bordo del satélite Sentinel 5P, que están disponibles página web: [www.code.earthengine.google.com](http://www.code.earthengine.google.com). “Es un entorno de desarrollo integrado (IDE) web de Python y JavaScript” (Earth Engine, 2018), se procedió a generar los scripts que

permitieron la extracción de la información, recopilando una gran variedad de imágenes a escala global para el periodo 2018 al 2021.

### 3.4.3 Metodología de procesamiento de datos TROPOMI- Sentinel-5P

La metodología aplicada para la generación de datos de los contaminantes se ha considerado las características de los datos del sensor TROPOMI-Sentinel 5P:

**Tabla 2**

*Características de disponibilidad de datos de TROPOMI-Sentinel 5P*

Contaminante	Características	Especificaciones
Monóxido de Carbono (CO)	Disponibilidad de datos	28 de julio del 2018 hasta 31 de diciembre 2021
	Proveedor de datos	Unión Europea, Agencia Espacial Europea (ESA) y Copernicus
	GEE Snippet	ee. ImageCollection("COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_CO")
	Banda	CO_column_number_density
	Unidad	<i>mol/m<sup>2</sup></i>
Dióxido de nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	Disponibilidad de datos	28 de julio del 2018 hasta 31 de diciembre 2021
	Proveedor de datos	Unión Europea, Agencia Espacial Europea (ESA) y Copernicus
	GEE Snippet	ee. ImageCollection("COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_NO2")
	Banda	NO2_column_number_density
	Unidad	<i>mol/m<sup>2</sup></i>

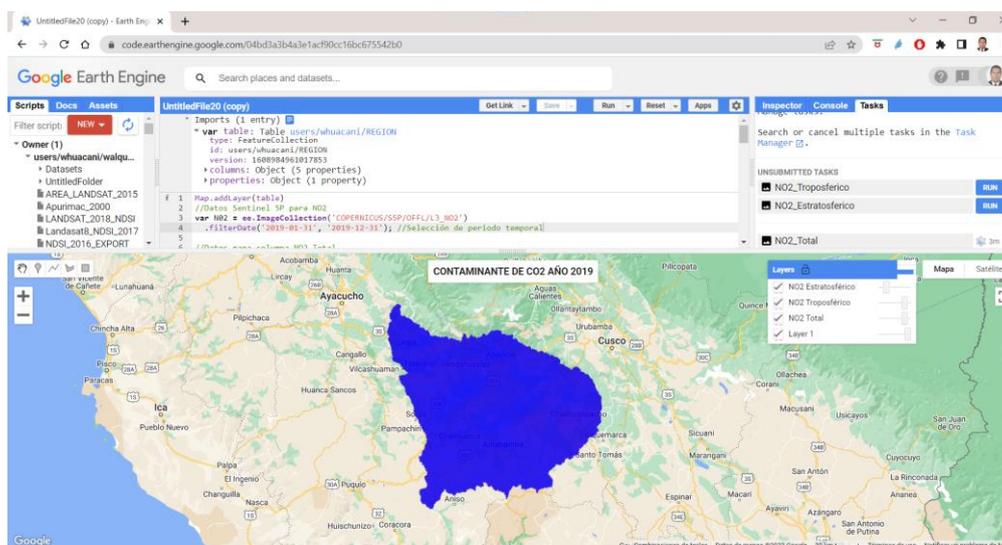
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	Disponibilidad de datos	07 de octubre del 2018 hasta 31 de diciembre 2021
	Proveedor de datos	Unión Europea, Agencia Espacial Europea (ESA) y Copernicus
	GEE Snippet	ee. ImageCollection("COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_SO2")
	Banda	SO2_column_number_density
	Unidad	mol/m <sup>2</sup>

Fuente: <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentinel-5p>

Para la obtención de la información satelital de contaminantes del aire atmosférico se aplicó los algoritmos en JavaScript en la plataforma Google Earth Engine, donde se visualiza en la figura 3 el procedimiento, el script para el procesamiento de datos se muestra en los anexos: (Ver anexo)

**Figura 3**

*Procesamiento de datos en la plataforma de (GEE) para el contaminante (NO<sub>2</sub>) periodo 2019*



*Nota.* La grafica muestra la determinación del contaminante del dióxido de nitrógeno

#### **3.4.4 Análisis de datos estadísticos**

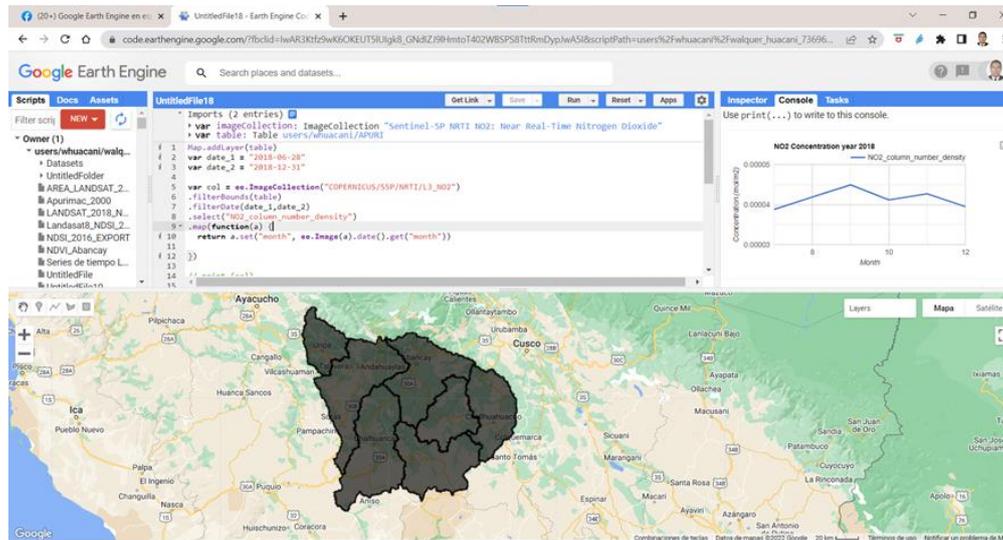
Se analizará la base de datos generados por el satelital para cada contaminante estudiado, esto permite obtener una lectura con el promedio de las emisiones de los contaminantes del aire atmosférico durante el período de tiempo analizado, se repetirá este proceso durante períodos diferente, para ello se utilizará el programa de Sistema de Información Geográfica para realizar el ajuste correspondiente para cada periodo, teniendo en cuenta los valores máximos y mínimos. Se realizará la interpretación visual por cada provincia de acuerdo al rango de colores comparando sus niveles de concentración de los contaminantes.

#### **3.4.5 Series de tiempo**

Mediante la información obtenido, en el proceso de la data de productos TROPOMI Sentinel-5P, se elabora el script en el algoritmo JavaScript para generar las gráficas de las series de tiempo manipulando la plataforma de Google Earth Engine (GEE) con algoritmos de JavaScript para cada uno de los contaminantes en estudio (CO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>), la plataforma de (GEE) promediará las concentraciones diarias, semanales y mensuales, para ello se presenta el desarrollo del Script en los anexos, para determinar la serie de tiempos para cada contaminante se presenta como ejemplo en la figura 4.

Figura 4

Calculo de series de tiempo del contaminante ( $\text{NO}_2$ ) dióxido de nitrógeno



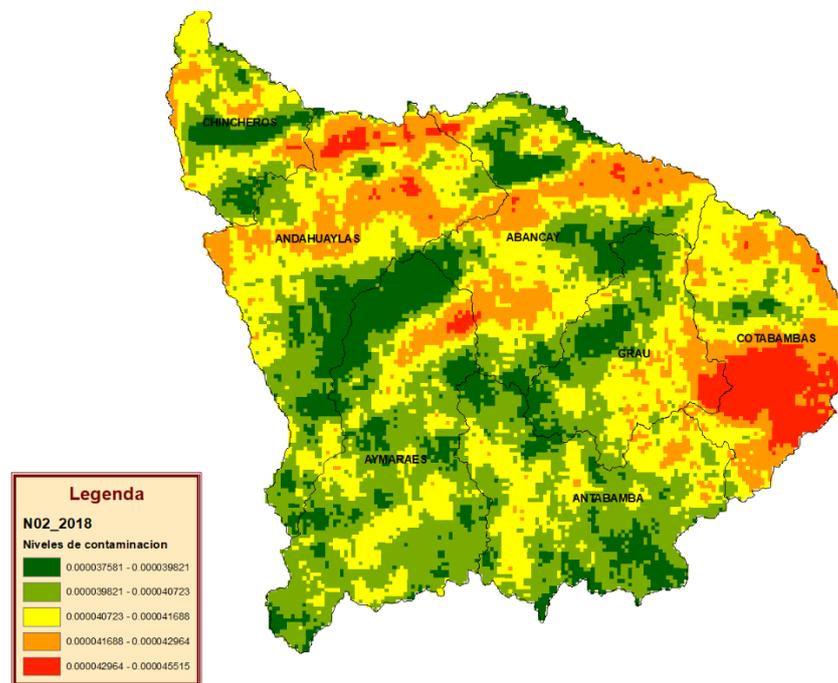
Nota. El gráfico muestra la serie de tiempo del contaminante dióxido de nitrógeno

### 3.4.6 Mapas de concentración anual

Mediante la aplicación de los programas de Sistema de Información Geográfica (GIS), se generaron los mapas en formato TIFF de promedio anual por periodos de las concentraciones de cada uno de los contaminantes dentro el área de estudio, donde se visualiza los horizontes de contaminación procesados por cada producto requerido.

**Figura 5**

*Mapas de concentración del contaminante dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>)*



*Nota.* El gráfico muestra la presencia de contaminante dióxido de nitrógeno periodo 2018

## **CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSION**

### **4.1 Marco metodológico (tipo y diseño de investigación, población, muestra, instrumentos).**

El tipo de investigación es de alcance descriptivo para Hernández et al. (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, parten de un efecto y regresan a buscar la causa” (p.320).

A su vez también Hernández et al. (2014) manifiesta que: “los estudios descriptivos buscan especificar propiedades y características importantes de cualquier fenómeno que se analice, es decir pretenden medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o las variables a las que se refieren.” (p. 92).

#### **4.1.1 Población**

La población para el presente estudio es la Región de Apurímac que tiene una extensión de 20 896 km<sup>2</sup>

#### **4.1.2 Muestra**

La muestra está constituida por todas las imágenes obtenidas del satélite Sentinel - 5P que cubre el área de la región de Apurímac para los periodos de 2018-2021.

### 4.1.3 Instrumentos

#### 4.1.3.1 Satélite Copernicus Sentinel-5P

El instrumento aplicado es el sensor TROPOMI, del Satélite Copernicus Sentinel – 5P están acumulando datos de monitoreo de los contaminantes del aire atmosférico de SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, estos datos ayudan a estimar la variabilidad espacial y conocer las diferentes concentraciones de los contaminantes presentes en la atmósfera.

#### 4.1.3.2 Programas utilizados

Los programas utilizados en este estudio de contaminación del aire atmosférico, debido a sus características y potenciales que presentan cada uno de ellos, se enumeran a continuación:

**Tabla 3**

*Programas y acciones*

<b>Programa o plataforma</b>	<b>Acciones</b>
Google Earth Engine	Procesamiento de datos de la información satelital.
ArcGis	Exportación de los valores de los ráster de las imágenes satelitales
RStudio	Para los cálculos estadísticos de los datos, correlaciones y gráficas de comportamiento de los contaminantes en el tiempo
JavaScript	Lenguaje de programación para determinar a los valores de los contaminantes

Excel	Para procesamiento de datos de los contaminantes, análisis estadístico y generación de gráficas
-------	---

Nota. La tabla indica los paquetes informáticos aplicados en el presente trabajo.

#### 4.1.4 Metodología

La metodología desarrollada para este estudio se describe en el Cuadro 1 para este trabajo de investigación es partir de procesamiento de datos de imágenes Sentinel-5P del sensor TROPOMI, de contaminantes como O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>, estos datos están disponibles gratuitamente para el público. Para procesar los datos de los contaminantes, se aplicó la técnica de percepción remota de aprendizaje automático en la plataforma Google Earth Engine (GEE) disponible en: <https://earthengine.google.com/>.

La principal herramienta para el procesamiento de datos de satélite fue el entorno de Google Earth Engine, que admitió obtener las imágenes satelitales generadas por el censo TROPOMI Sentinel-5P en formato TIF de cada contaminante.

#### Procedimiento

Para el presente trabajo de investigación se realizó una búsqueda de datos en la plataforma de GEE, con algoritmos de JavaScript para luego procesar y descargar las imágenes satelitales del Satélite Copernicus Sentinel - 5P para obtener las concentraciones de los siguientes contaminantes atmosféricos CO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>, donde fueron filtrados temporalmente para los periodos 2018 al 2021 en la plataforma de GEE, estas fueron procesadas con el lenguaje de programación JavaScript, estos

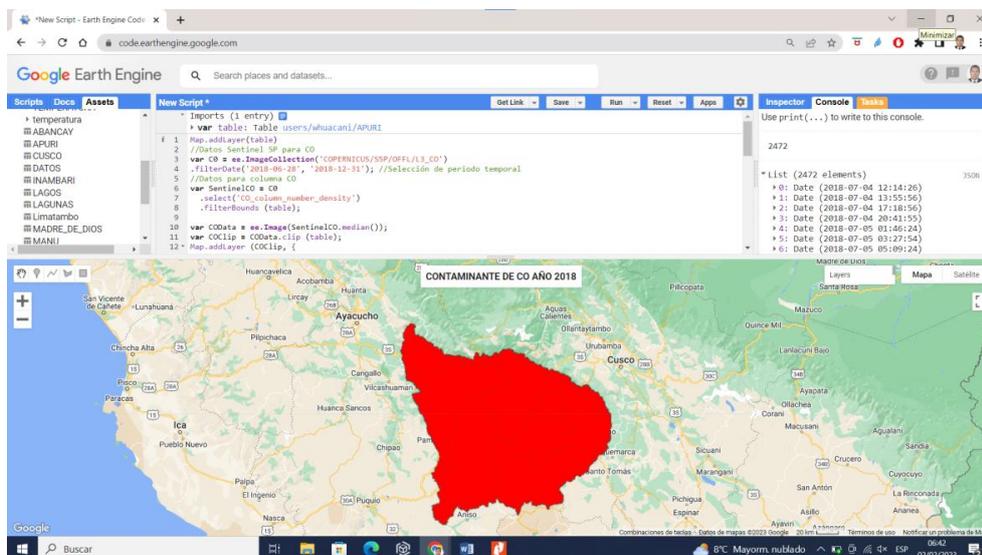
resultados fueron llevadas al software ArcGis en donde se ha procesado los datos por periodos obteniéndose valores mensuales para el periodo de estudio.

## Procesamiento de datos en la plataforma GEE contaminante Monóxido de Carbono (CO)

Los datos de procesamiento se han efectuado en la plataforma de GEE, con el lenguaje de programación en JavaScript, en el procesamiento de datos se ha utilizado data de 2472 imágenes desde el periodo de 06-08-2018 hasta el 31-12-2018, correspondiente al periodo 2018, la programación se presenta en los anexos.

**Figura 6**

*Procesamiento de datos del contaminante (CO) monóxido de carbono*



*Nota.* El gráfico muestra el procesamiento de contaminante de monóxido de carbono periodo 2018

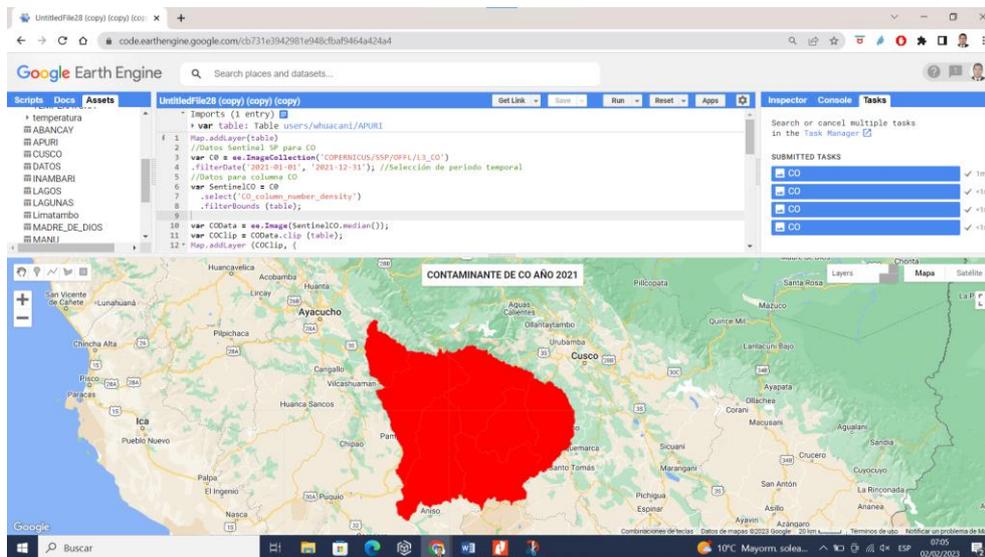
El procesamiento de datos del contaminante monóxido de carbono del año 2018 se puede visualizar en el siguiente Link:

<https://code.earthengine.google.com/b8d02dea55846fb613e8375c56262e2a>

Los datos de procesamiento para el periodo 2021 se han efectuado en la plataforma de GEE, con el lenguaje de programación en JavaScript, en el procesamiento de datos se ha utilizado data de 5102 imágenes desde el periodo de 01-01-2021 hasta el 31-12-2021, correspondiente al periodo 2021, la programación se presenta en los anexos.

**Figura 7**

*Procesamiento de datos del contaminante (CO) monóxido de carbono año 2021*



*Nota.* El gráfico muestra el procesamiento de contaminante de monóxido de carbono periodo 2021

El procesamiento de datos del contaminante Monóxido de Carbono del año 2021 se puede visualizar en el siguiente Link:

<https://code.earthengine.google.com/cb731e3942981e948cfbaf9464a424a4>

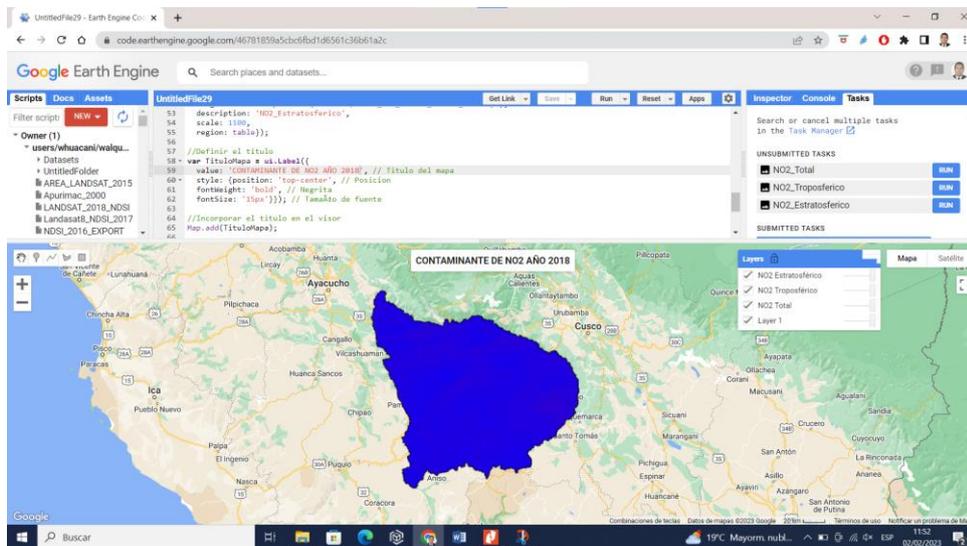
## **Procesamiento de datos en la plataforma GEE contaminante Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>)**

Los datos de procesamiento se han efectuado en la plataforma de GEE, con el lenguaje de programación en JavaScript, para el procesamiento de datos se ha utilizado imágenes desde el periodo de 06-08-2018 hasta el 31-12-2018,

correspondiente al periodo 2018, en este trabajo se ha considerado la concentración total del contaminante, tomando en cuenta la concentración en la Troposférico y Estratosférico; para extraer los contaminantes que se presenta en los anexos se ha procesado en la plataforma de GEE para extraer los contaminantes, estos se presentan en los anexos.

**Figura 8**

*Procesamiento de datos del contaminante (NO<sub>2</sub>) dióxido de nitrógeno*



*Nota.* El gráfico muestra el procesamiento de contaminante de dióxido de nitrógeno periodo 2018

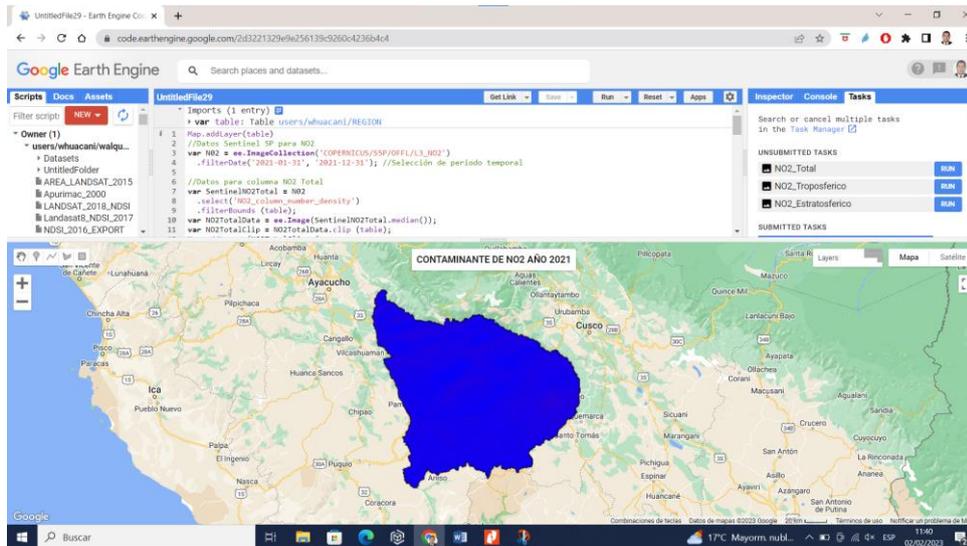
El procesamiento de datos del contaminante dióxido de nitrógeno del año 2018 se puede visualizar en el siguiente Link:

<https://code.earthengine.google.com/46781859a5cbc6fbd1d6561c36b61a2c>

Los datos de procesamiento para el periodo 2021 se han efectuado en la plataforma de GEE, con el lenguaje de programación en JavaScript, en el procesamiento de datos de imágenes desde el periodo de 01-01-2021 hasta el 31-12-2021, correspondiente al periodo 2021, la programación se presenta en los anexos.

**Figura 9**

*Procesamiento de datos del contaminante (NO<sub>2</sub>) dióxido de nitrógeno*



*Nota.* El gráfico muestra el procesamiento de contaminante de dióxido de nitrógeno periodo 2021

El procesamiento de datos del contaminante dióxido de nitrógeno del año 2021 se puede visualizar en el siguiente Link:

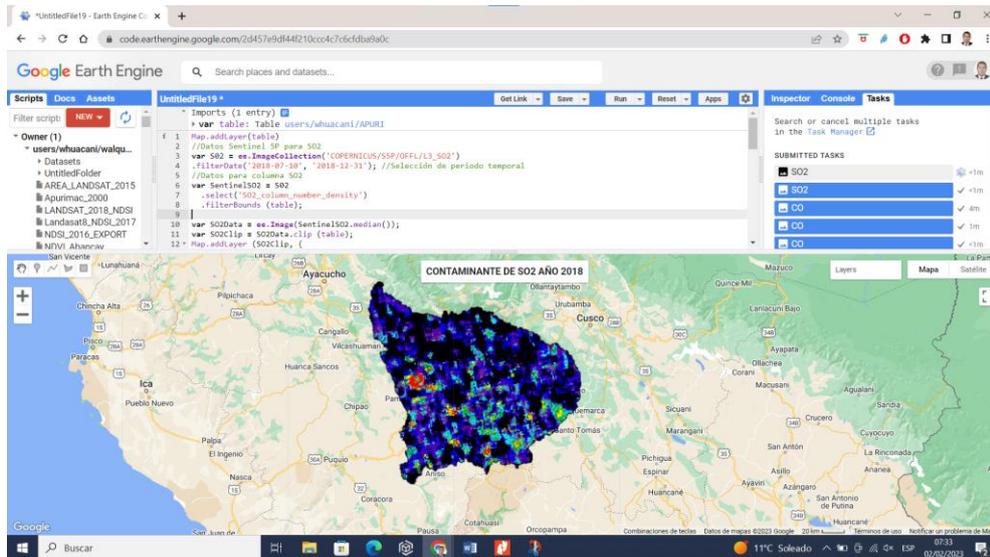
<https://code.earthengine.google.com/2d3221329e9e256139c9260c4236b4c4>

## **Procesamiento de datos en la plataforma GEE contaminante Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>)**

Los datos de procesamiento se han efectuado en la plataforma de GEE, con el lenguaje de programación en JavaScript, en el procesamiento de datos se ha utilizado data de 448 imágenes desde el periodo de 07-10-2018 hasta el 31-12-2018, correspondiente al periodo 2018, la programación se presenta en los anexos.

**Figura 10**

*Procesamiento de datos del contaminante (SO<sub>2</sub>) dióxido de azufre*



*Nota.* El gráfico muestra el procesamiento de contaminante de dióxido de azufre periodo 2018

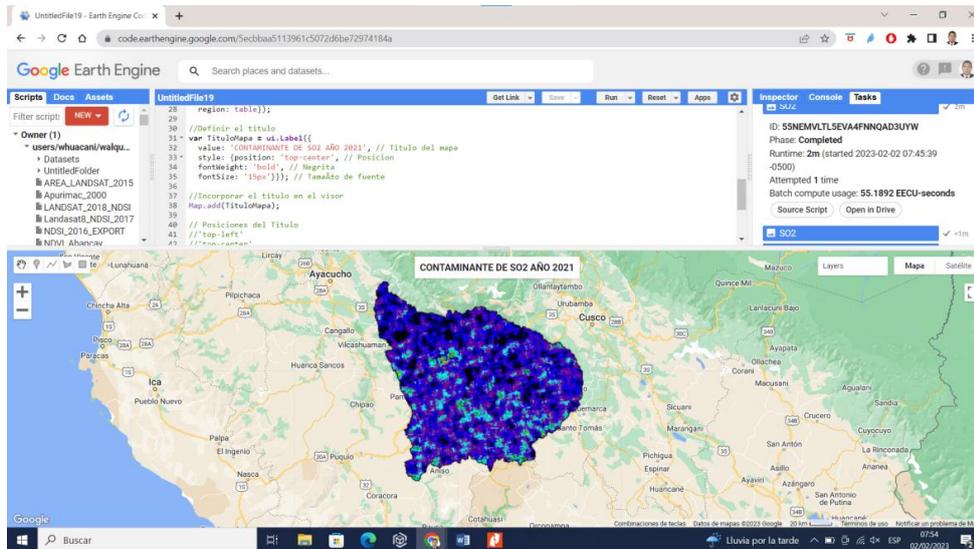
El procesamiento de datos del contaminante Dióxido de Azufre del año 2018 se puede visualizar en el siguiente Link:

<https://code.earthengine.google.com/67278389ed68fd2b258b2a11fc8a9630>

Los datos de procesamiento para el periodo 2021 se han efectuado en la plataforma de GEE, con el lenguaje de programación en JavaScript, en el procesamiento de datos se ha utilizado data de 5122 imágenes desde el periodo de 01-01-2021 hasta el 31-12-2021, correspondiente al periodo 2021, la programación se presenta en los anexos.

**Figura 11**

*Procesamiento de datos del contaminante (SO<sub>2</sub>) dióxido de azufre*



*Nota.* El gráfico muestra el procesamiento de contaminante de dióxido de azufre periodo 2021

El procesamiento de datos del contaminante dióxido de azufre del año 2021 se puede visualizar en el siguiente Link:

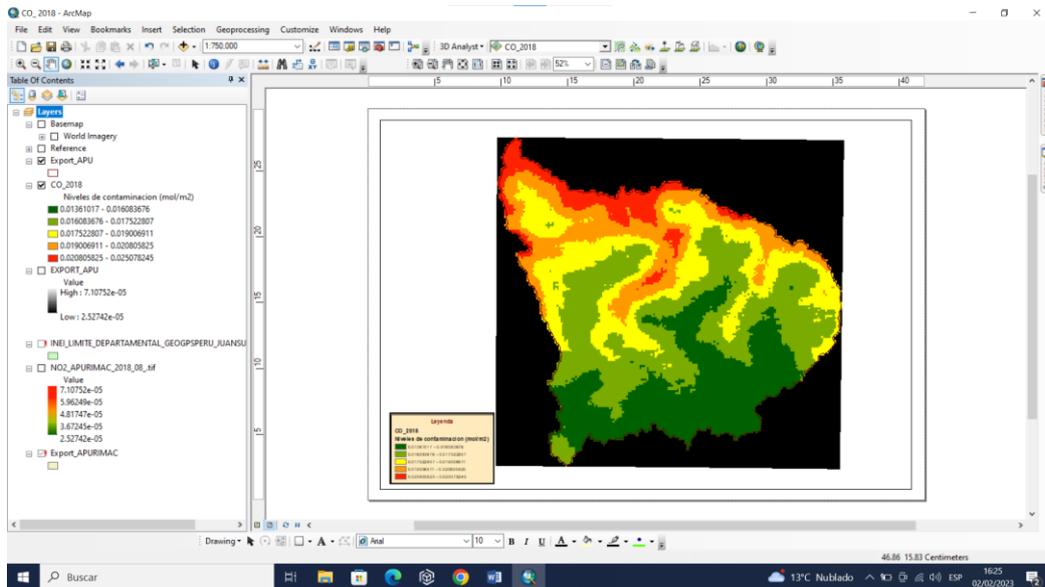
<https://code.earthengine.google.com/5ecbbaa5113961c5072d6be72974184a>

## **Extracción de valores en ArcGIS**

Luego de la información obtenida de cada contaminante en formato TIF, por periodos anuales en Google Earth Engine, este archivo se descarga y se almacena en mapas de bits o rásters, de los contaminantes Monóxido de Carbono (CO), el Dióxido de Nitrógeno (NO<sub>2</sub>) y el Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>) periodos que corresponden de 2018 al 2021, luego fueron procesados en el software ArcGIS para obtener los datos numéricamente de cada rásters, se utilizó la caja de herramienta del GIS, donde está la extensión ArcToolbox.

**Figura 12**

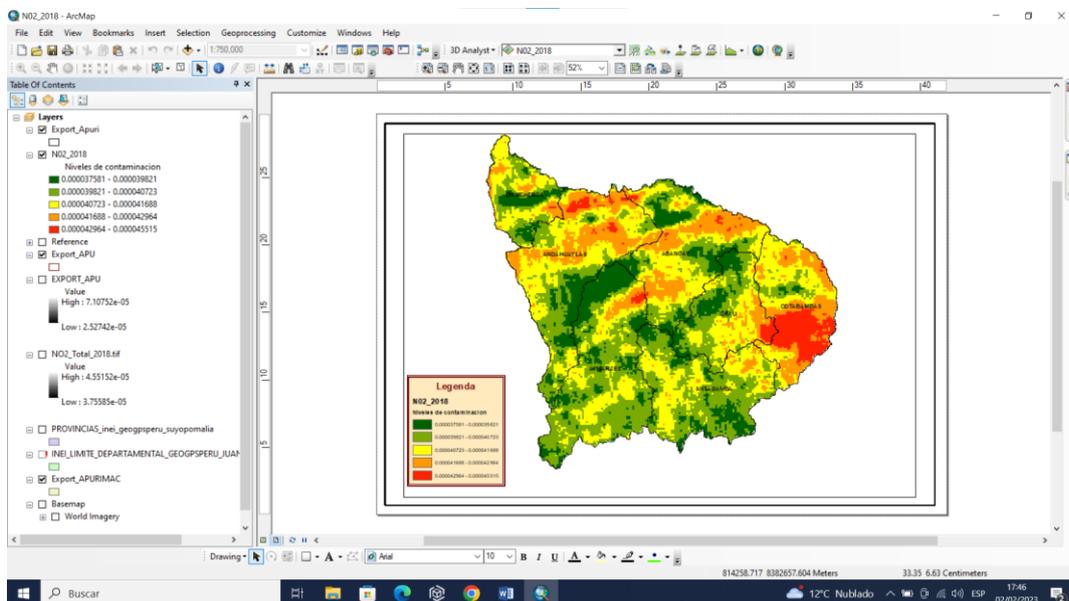
*Procesamiento de datos en ArcGis contaminante (CO) monóxido de carbono*



*Nota.* El gráfico muestra el procesamiento de datos contaminante de monóxido de carbono periodo 2018

**Figura 13**

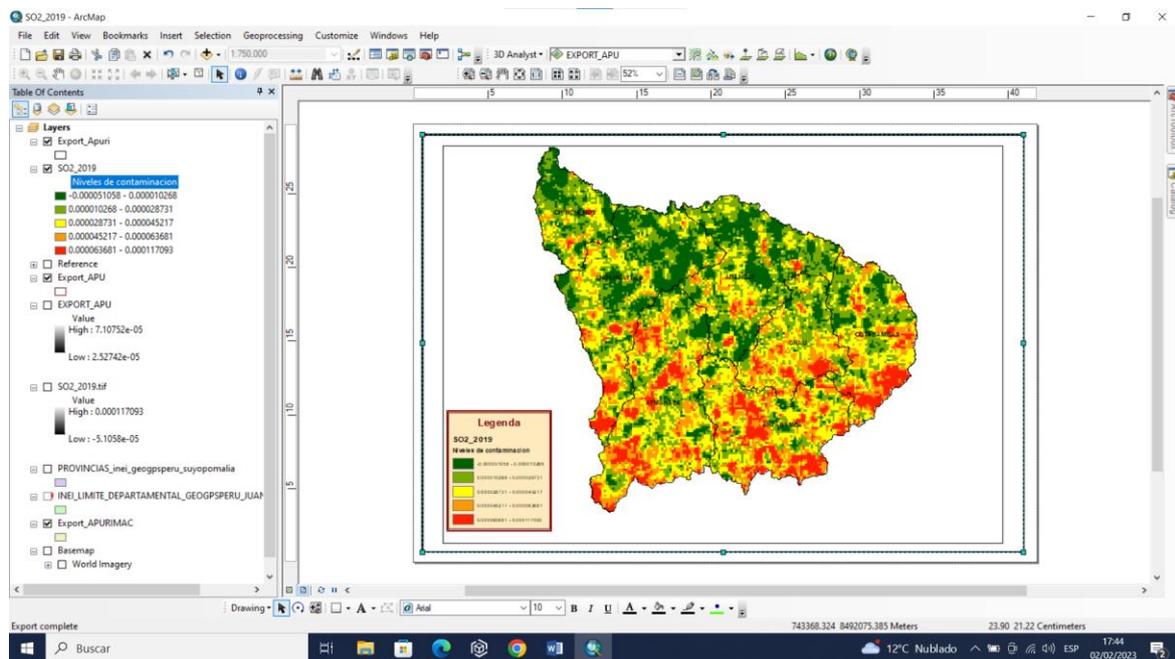
*Procesamiento de datos en ArcGis contaminante (NO<sub>2</sub>) dióxido de nitrógeno total*



*Nota.* El gráfico muestra el procesamiento de datos contaminante de dióxido de nitrógeno Total periodo 2018

**Figura 14**

*Procesamiento de datos en ArcGis contaminante (SO<sub>2</sub>) dióxido de azufre*



*Nota.* El gráfico muestra el procesamiento de datos contaminante de dióxido de azufre periodo 2019

## 4.2 Resultados por objetivos

Los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, se muestran de acuerdo a los objetivos plasmados en el presente estudio, es decir, se ha determinado las concentraciones de los contaminantes atmosféricos CO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>, tratando las imágenes del Satélite Copernicus Sentinel – 5P, todo el procedimiento se desarrolló en la plataforma de Google Earth Engine, para el pos procesamiento el software ArcGis, para los periodos del 2018 al 2021 de la región de Apurímac.

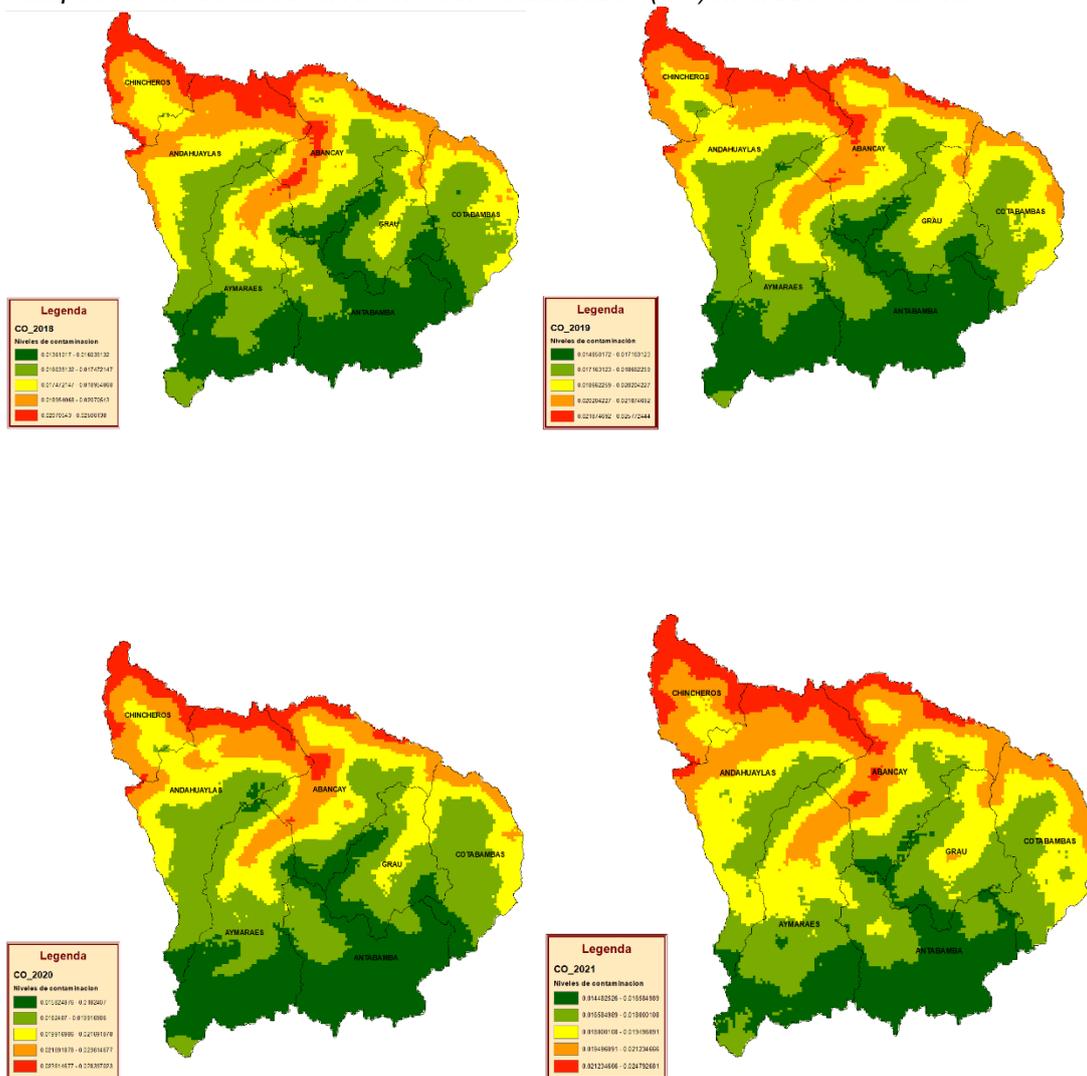
Estos resultados logrados en el desarrollo del modelamiento de los contaminantes por medio de la plataforma de GEE del Satélite Copernicus Sentinel – 5P, aplicando los algoritmos del lenguaje de programación JavaScript a su vez también procesando estos datos en el Sistema de Información Geográfica ArcGis para hacer los ajustes correspondientes, los resultados se presentan a continuación.

## 4.2.1 Concentración de los contaminantes atmosféricos de los gases de CO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>

### 4.2.1.1 Contaminante monóxido de carbono (CO)

Figura 15

Mapas raster de datos en ArcGis del contaminante (CO) monóxido de carbono

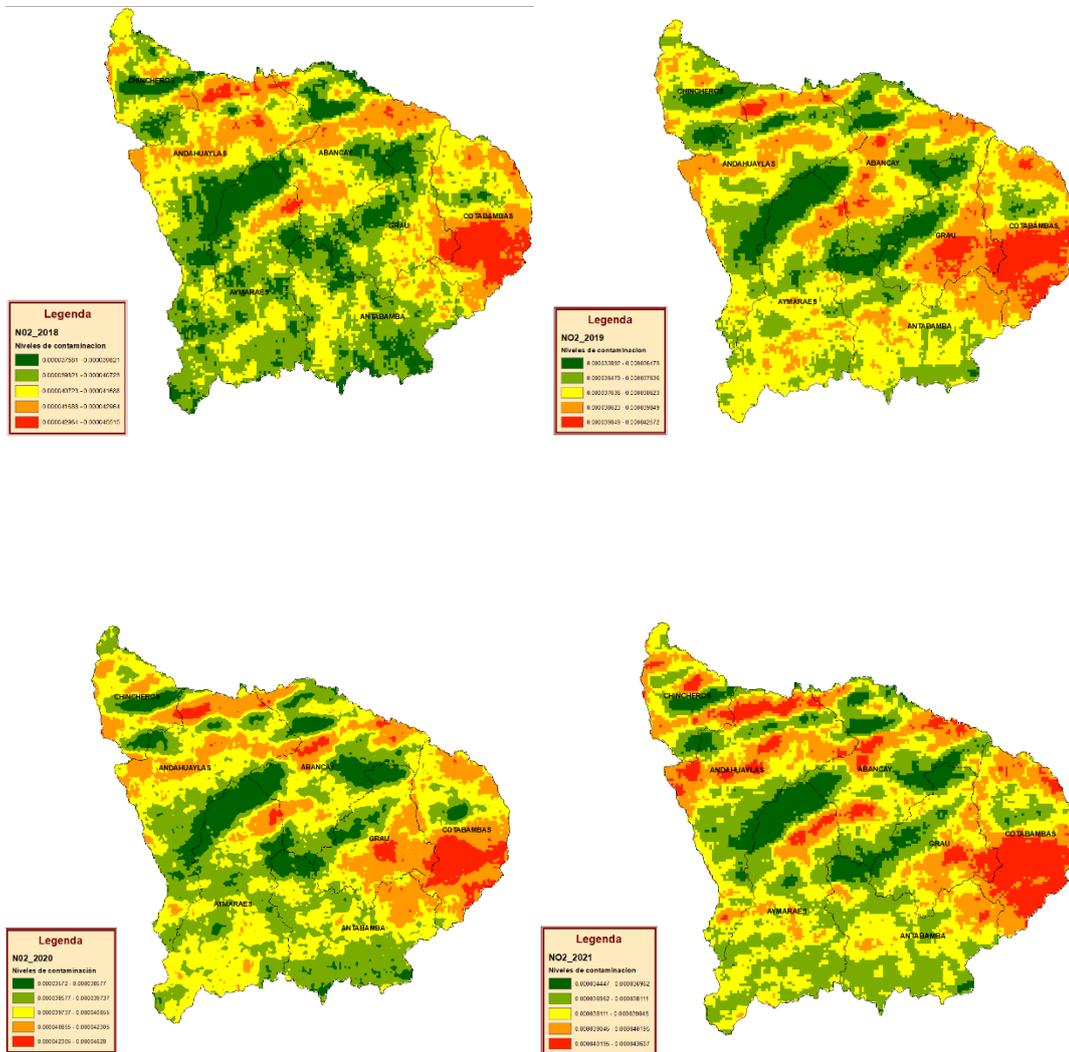


Nota. El gráfico muestra el resultado final de datos contaminante (CO) monóxido de carbono periodo 2018 al 2021

### 4.2.1.2 Contaminante dióxido de nitrógeno total (NO<sub>2</sub>)

**Figura 16**

Mapas raster de datos en ArcGis del contaminante ( $\text{NO}_2$ ) dióxido de nitrógeno total

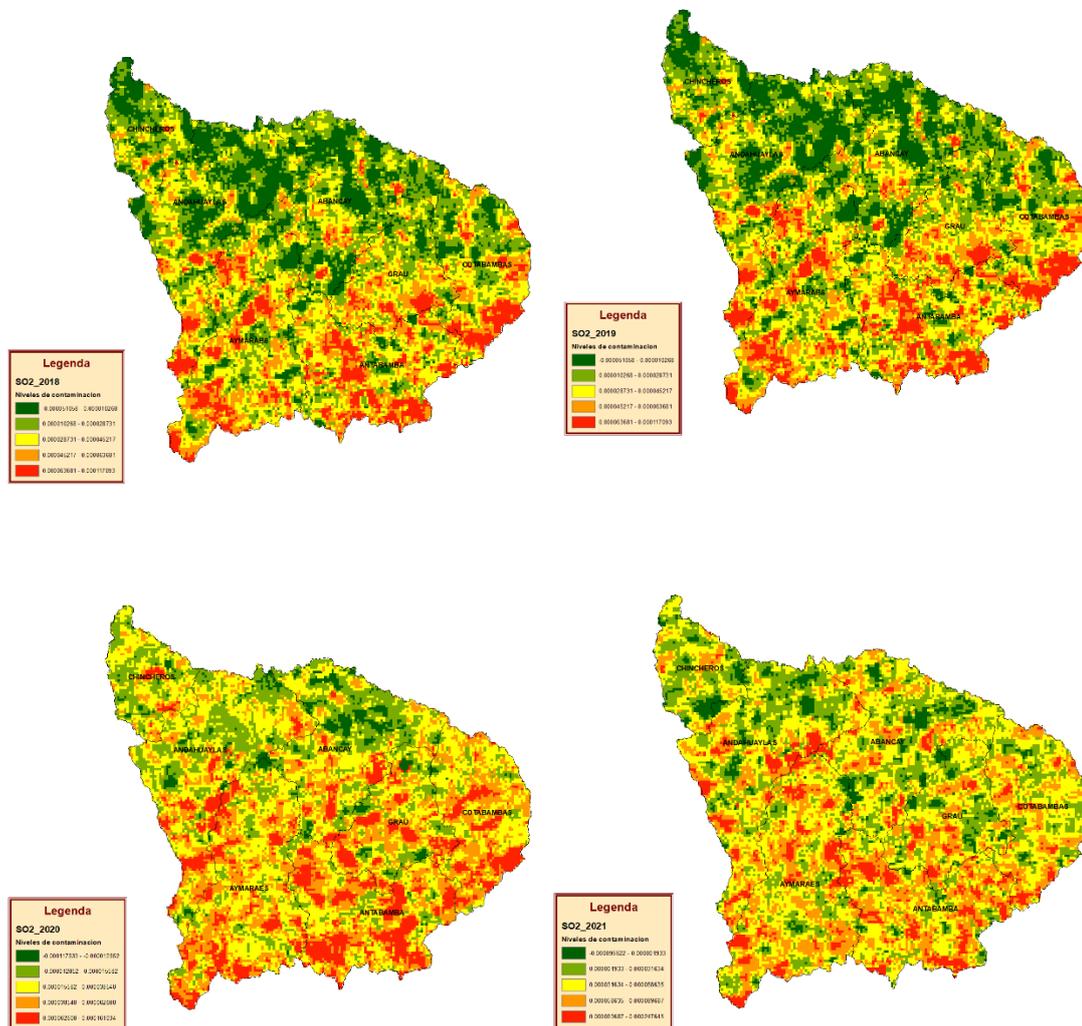


Nota. El gráfico muestra el resultado final de datos contaminante ( $\text{NO}_2$ ) de concentración total de dióxido de nitrógeno periodo 2018 al 2021

#### 4.2.1.3 Contaminante dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ )

**Figura 17**

Mapas raster de datos en ArcGis del contaminante (SO<sub>2</sub>) dióxido de azufre



Nota. El gráfico muestra el resultado final de datos contaminante (SO<sub>2</sub>) dióxido de azufre periodo 2018 al 2021

#### 4.2.2 Identificación de los sectores de mayor concentración

##### Contaminante monóxido de carbono (CO)

El modelamiento de datos se ha efectuado en el programa ArcGis, este proceso se muestra en la figura 15 donde podemos ver en la región de

Apurímac, se muestra las concentraciones del monóxido de carbono, durante el periodo 2018, donde se registran los valores de concentraciones de CO en el área de estudio, como se puede ver las concentraciones máximas se registran la provincia de Abancay llegando a valores que varían de 0.0207 a 0.0251 de mol/m<sup>2</sup>, las concentraciones mínimas generadas se presentan en la provincia de Antabamba y parte de Aymaraes, los niveles oscilan entre 0.0136 – 0.0160 mol/m<sup>2</sup> de concentración del contaminante.

Durante el periodo 2019 la provincia de Abancay incrementa su contaminación de CO en un porcentaje que esta entre 0.0236 – 0.0284 mol/m<sup>2</sup>, así mismo existe un incremento de contaminantes en la provincia de Chincheros, Andahuaylas y parte de Cotabambas cuyos valores fluctúan de 0.0199 - 0.0217 mol/m<sup>2</sup>.

Por otra parte, en el periodo de modelamiento del 2020 hay menor presencia de CO en las provincias de Andabamba, Aymaraes y Grau, llegando a valores de 0.015 – 0.0182 mol/m<sup>2</sup>, visualizando para el periodo 2021 los niveles han bajado a niveles de 0.0145 – 0.0166 mol/m<sup>2</sup>.

Resumiendo, estas concentraciones según el análisis podemos afirmar en zonas donde hay mayor vegetación, zonas de menor altitud hay concentraciones del CO, en pisos ecológicos elevadas, como en las provincias que se ubican a mayor altitud hay menor concentración de monóxido de carbono tal como se puede visualizar en los mapas.

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

El dióxido de nitrógeno presente en la atmosfera integra al grupo de contaminantes gaseosos que se generan por los vehículos de transporte, fábricas, por la quema de combustibles fósiles, la presencia en el aire de este contaminante ayuda a la formación de otros contaminantes como el ozono, las partículas en suspensión, asimismo a la presencia de la lluvia ácida. Estudios efectuados sobre las personas resultan que a la exposición a largo plazo al NO<sub>2</sub> pueden provocar una reducción de la función pulmonar y incrementar el riesgo de aparición de síntomas respiratorios como la tos, bronquitis aguda y la aparición de la flema en los niños.

En la figura 16 se realizó el modelamiento y simulación del contaminante del aire atmosférico el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) de la región de Apurímac, donde los resultados de concentración son bajos para el periodo 2018 en las localidades de Grau, Antabamba, Aymaraes y Chincheros con niveles bajos que varían desde 0.000037 a 0.000040 mol/m<sup>2</sup>, por otra parte las concentraciones máximas para este periodo oscilan entre 0.0000430 - 0.000045 mol/m<sup>2</sup>, se presentan mayormente en las provincias de Cotabambas y Abancay, para el periodo 2019 se mantiene los valores anteriores, en el año 2021 se presentaron valores elevados en las localidades de la provincia de Cotabambas, Andahuaylas, Abancay y Chincheros con intervalo de valores que están en 0.000040 – 0.000044 mol/m<sup>2</sup>.

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

El dióxido de azufre es un gas que se caracteriza por ser incoloro que se presenta en el ambiente, es muy irritante cuando se elevada su

concentración. Su aparición en el aire es debido a la combustión generada por los fósiles, esencialmente por el carbón y los derivados del petróleo. Este gas tiene la peculiaridad de presentarse como irritante, también tiene la capacidad de transformarse en ácido sulfúrico que afecta a los órganos del tracto respiratorio.

Los datos obtenidos en el muestreo para  $\text{SO}_2$  se pueden observar en la figura 17, los resultados de concentración final obtenidos se pueden observar visiblemente los valores de mayor concentración se encuentran mayormente en las provincias de Abancay, Chincheros, Andahuaylas, Grau, Aymaraes, Antabamba y Cotabambas con valores que varían entre 0.000015 a 0.000161 mol/m<sup>2</sup> para los periodos del 2020 y 2021, en estos dos periodos existió mayor incremento de los contaminantes.

De la misma forma todas las provincias que conforman la región de Apurímac como son Abancay, Chincheros, Andahuaylas y parte de Cotabambas han bajado su nivel de concentración en el periodo 2018 con valores que van desde -0.0000103 a 0.000089 mol/m<sup>2</sup> tal como se muestra en las imágenes ráster.

#### **4.2.3 Análisis de la variabilidad de las concentraciones CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> con relación al tiempo**

Mediante los datos obtenidos en el procesamiento de los productos Sentinel-5P, se ha generado las gráficas de series de tiempo utilizando la plataforma de Google Earth Engine de cada uno los niveles de contaminantes CO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>, estos se han

promediado sus concentraciones en forma mensual con el lenguaje de programación JavaScript.

Se genera la línea temporal mensual del periodo en estudio; de esta forma se visualiza la tendencia de las concentraciones, valores altos, bajos, cambios bruscos, con una visualización en la gráfica de los valores para cada periodo.

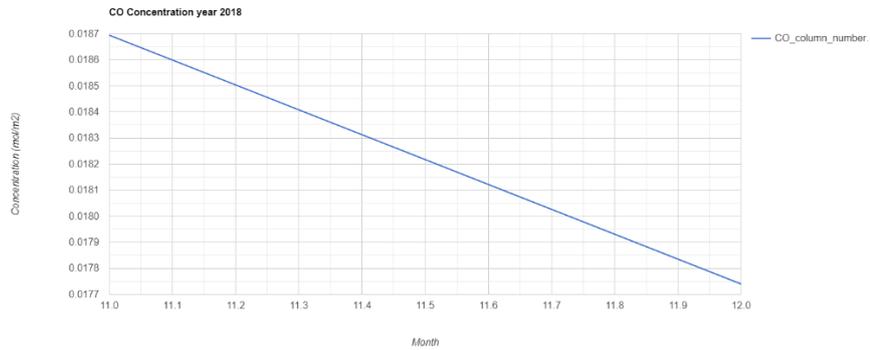
### **Series de tiempo del contaminante monóxido de carbono (CO)**

Este conjunto de datos de Sentinel-5P NRTI CO: Near Real-Time Carbon Monoxide muestra imágenes de alta resolución espacial y en tiempo real de las concentraciones de CO.

El monóxido de carbono (CO) es un “gas de traza atmosférico muy interesante para comprender el comportamiento de la troposférica. Las principales fuentes de generación del CO son esencialmente la combustión de los fósiles, los incendios de la biomasa y la oxidación atmosférica del metano y otros hidrocarburos. La combustión de combustibles fósiles se cataloga como la principal fuente de generación de CO en las latitudes medias septentrionales, la oxidación del isopreno y la quema de biomasa desempeñan un papel importante en los trópicos.

**Figura 18**

*Series de tiempo del contaminante (CO) monóxido de carbono periodo 2018*

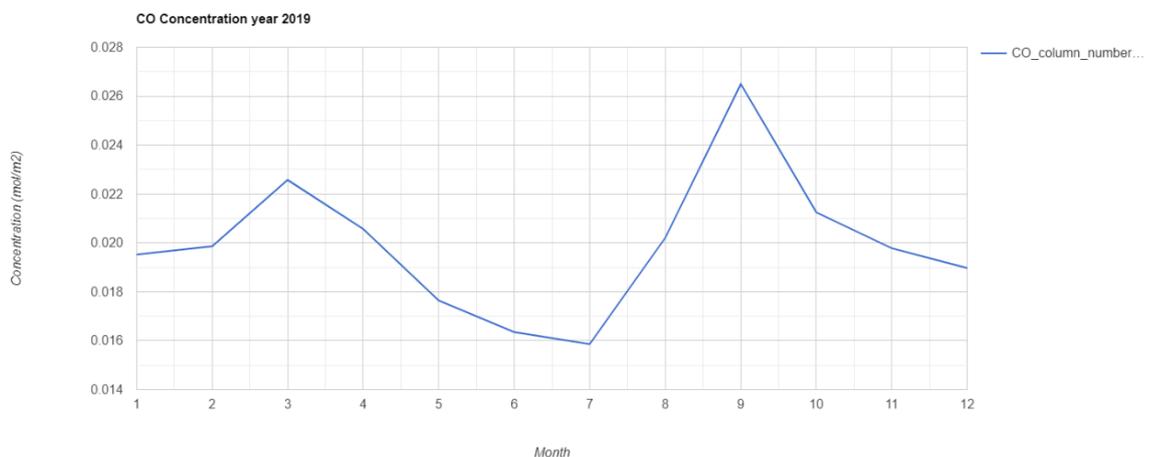


*Nota.* El gráfico muestra la serie de tiempos del contaminante (CO) monóxido de carbono periodo 2018

Interpretación de series de tiempo del contaminante monóxido de carbono (CO) con relación al tiempo, el contaminante atmosférico de monóxido de carbono (CO) para periodo 2018, se visualiza una recta con pendiente negativa debido a que la información de datos para este periodo no está registrada ningún dato de satélite Sentinel-5P.

**Figura 19**

*Series de tiempo del contaminante (CO) monóxido de carbono periodo 2019*

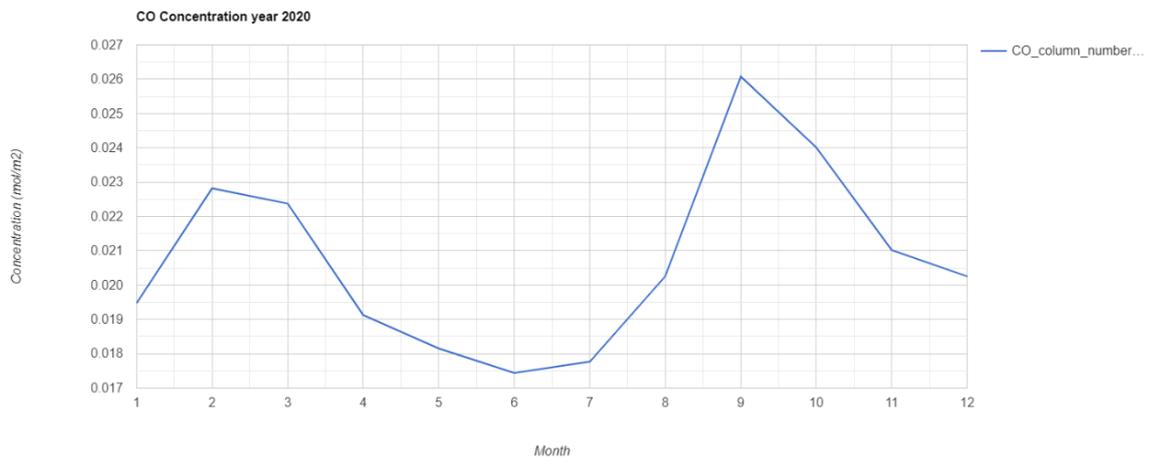


*Nota.* El gráfico muestra la serie de tiempos del contaminante (CO) monóxido de carbono periodo 2019

Interpretación de la figura 19 de series de tiempo del contaminante monóxido de carbono (CO) el año 2019 se puede apreciar el contaminante CO tiene una tendencia que llegan al pico más elevado a 0.026 mol/m<sup>2</sup> en el mes setiembre, el nivel más bajo corresponde al mes de julio cuyo valor alcanza a 0.016 mol/m<sup>2</sup> datos de satélite Sentinel-5P.

### Figura 20

*Series de tiempo del contaminante (CO) monóxido de carbono periodo 2020*

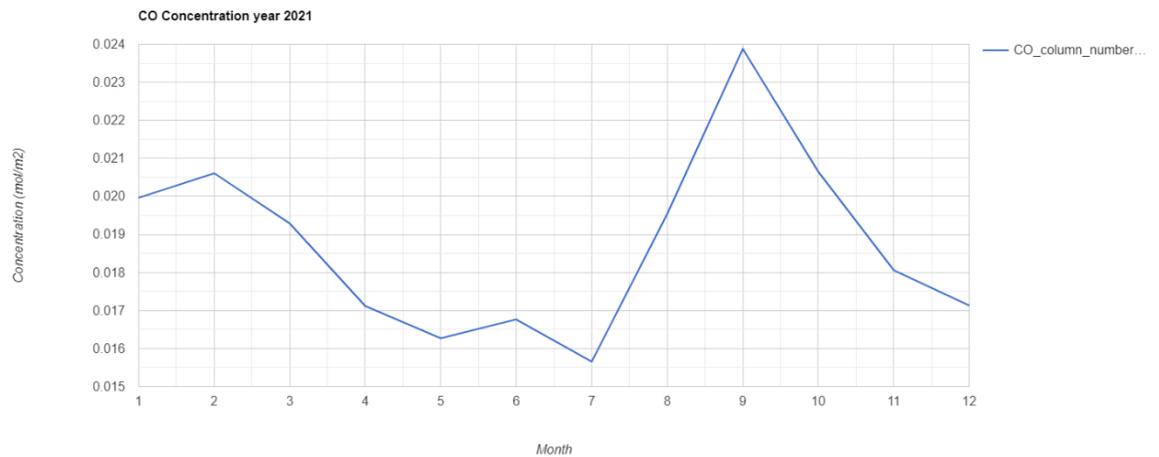


*Nota.* El gráfico muestra la serie de tiempos del contaminante (CO) monóxido de carbono periodo 2020

Interpretación de la figura 20 de series de tiempo del contaminante monóxido de carbono (CO) del año 2020 se puede visualizar puntos altos y bajos, las tendencias que llegan al pico más elevado a 0.026 mol/m<sup>2</sup> en el mes setiembre, el nivel más bajo corresponde al mes de junio cuyo valor alcanza a 0.017 mol/m<sup>2</sup> datos de satélite Sentinel-5P.

## Figura 21

*Series de tiempo del contaminante (CO) monóxido de carbono periodo 2021*



*Nota.* El gráfico muestra la serie de tiempos del contaminante (CO) monóxido de carbono periodo 2021

Interpretación de la figura 21 de series de tiempo del contaminante monóxido de carbono (CO) del año 2021, se presenta niveles elevados por ejemplo en el mes de setiembre llego a 0.024 mol/m<sup>2</sup>, la tendencia más baja corresponde al mes de julio cuyo valor alcanza a 0.015 mol/m<sup>2</sup> datos simulados del satélite Sentinel-5P.

## **Series de tiempo del contaminante dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>)**

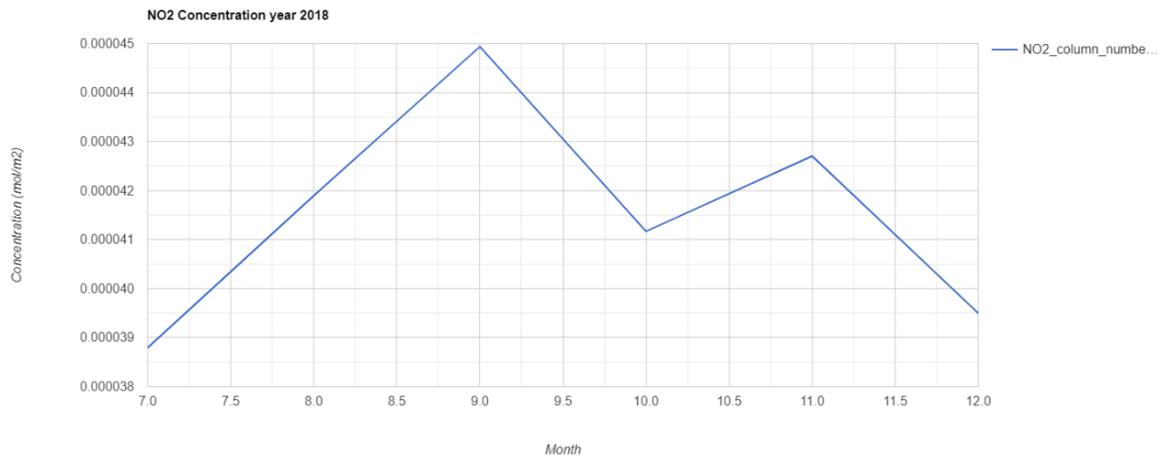
Este conjunto de datos de Sentinel-5P NRTI NO<sub>2</sub>: Near Real-Time Nitrogen Dioxide, provee imágenes de alta resolución en tiempo casi real de las concentraciones de NO<sub>2</sub>.

Estos óxidos de nitrógeno (NO<sub>2</sub> y NO) son importantes gases de traza en la atmósfera terrestre, permanecen en la troposfera y también en la estratosfera. Se introducen a la atmósfera debido a las actividades

antropogénicas (especialmente por la combustión de combustibles fósiles y la quema de la biodiversidad) y procesos naturales (incendios forestales, rayos y procesos microbiológicos en los suelos.

**Figura 22**

*Series de tiempo del contaminante (NO<sub>2</sub>) dióxido de nitrógeno periodo 2018*

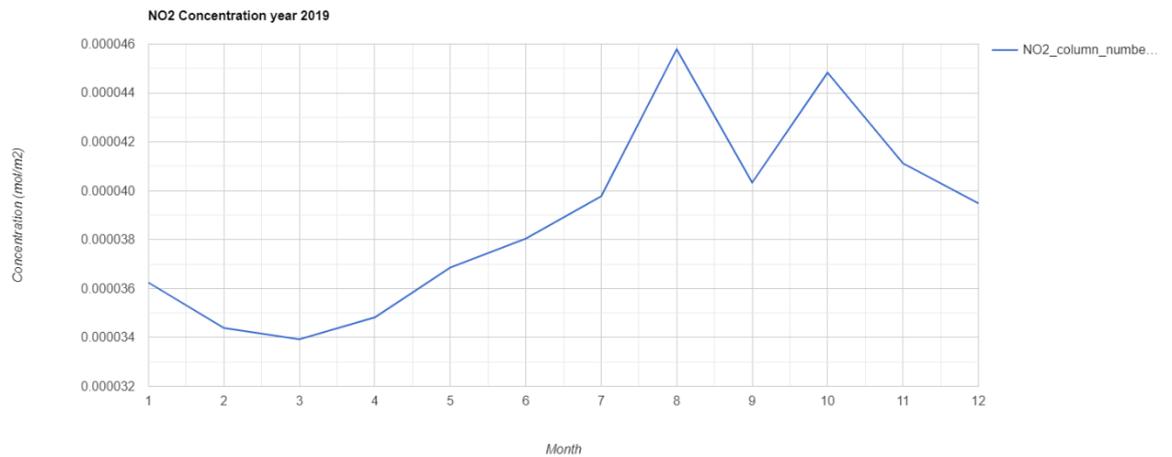


*Nota.* El gráfico muestra la serie de tiempos del contaminante (NO<sub>2</sub>) dióxido de nitrógeno periodo 2018

Según la información de la figura 22 de series de tiempo del contaminante dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) periodo 2018 se muestra que el mes de setiembre llega a un valor máximo de 0.000045 mol/m<sup>2</sup> y la tendencia más bajo corresponde al mes de enero 0.000038 mol/m<sup>2</sup>.

### Figura 23

Series de tiempo del contaminante ( $\text{NO}_2$ ) dióxido de nitrógeno periodo 2019

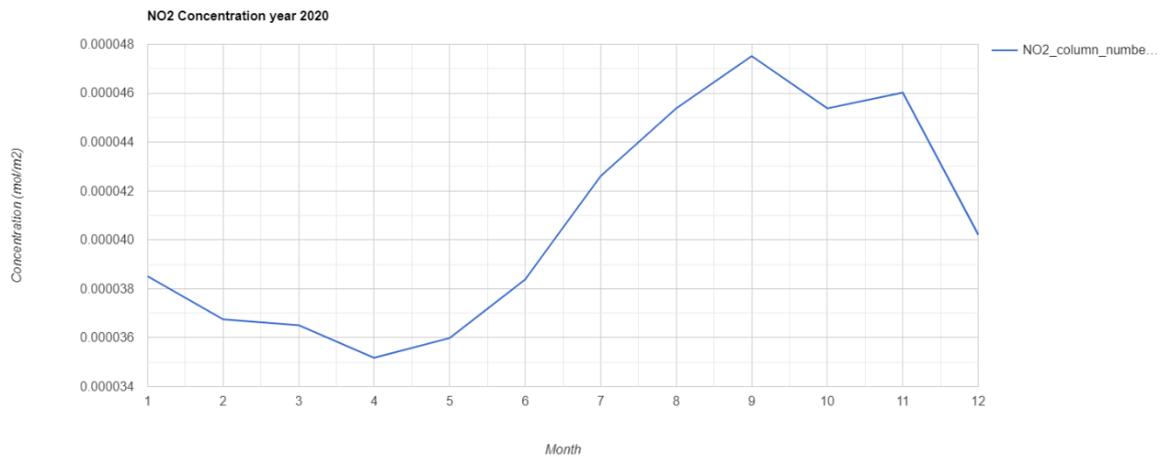


Nota. El gráfico muestra la serie de tiempos del contaminante ( $\text{NO}_2$ ) dióxido de nitrógeno periodo 2019

Realizando un análisis de la figura 23 de series de tiempo del contaminante dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ) periodo 2019, se muestra que el mes de agosto llega a un valor máximo de  $0.000046 \text{ mol/m}^2$  que corresponde a las provincias de Abancay y Andahuaylas y las tendencias más bajas en las provincias de Cotabambas y Grau que corresponde al mes de marzo con valor de  $0.000034 \text{ mol/m}^2$ .

**Figura 24**

*Series de tiempo del contaminante (NO<sub>2</sub>) dióxido de nitrógeno periodo 2020*

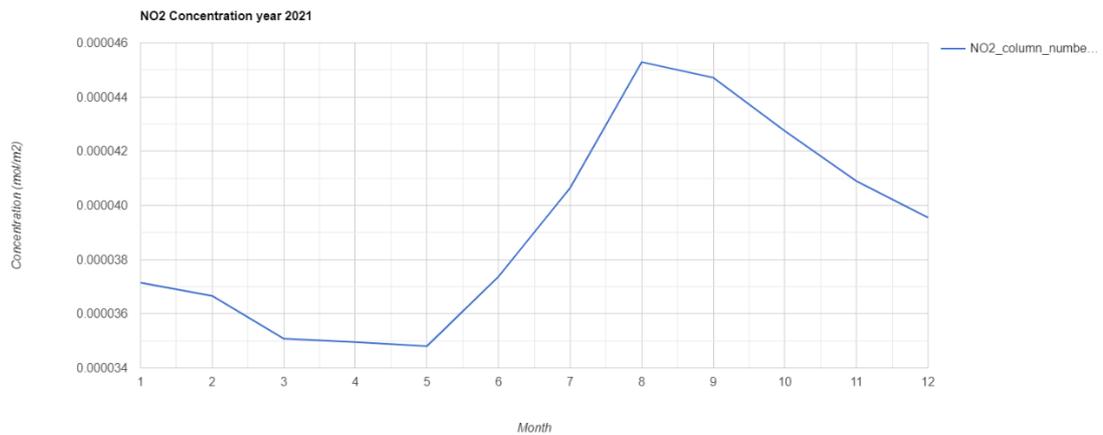


*Nota.* El gráfico muestra la serie de tiempos del contaminante (NO<sub>2</sub>) dióxido de nitrógeno periodo 2020

Tomando como referencia la figura 24 de series de tiempo del contaminante dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) periodo 2020, se muestra que en el mes de setiembre llega a niveles máximos de 0.000048 mol/m<sup>2</sup> y la tendencia más bajo corresponde al mes de abril cuyo valor es de 0.000034 mol/m<sup>2</sup>.

## Figura 25

*Series de tiempo del contaminante (NO<sub>2</sub>) dióxido de nitrógeno periodo 2021*



*Nota.* El gráfico muestra la serie de tiempos del contaminante (NO<sub>2</sub>) dióxido de nitrógeno periodo 2021

En la figura 25 se muestra la serie de tiempo del contaminante dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) periodo 2021, podemos indicar que en el mes de agosto llega a niveles máximos de 0.000045 mol/m<sup>2</sup> y contaminantes más bajos corresponde al mes de mayo cuyo valor es de 0.000035 mol/m<sup>2</sup>, que corresponde a las provincias de Cotabambas, Andahuaylas y Grau respectivamente.

## **Series de tiempo del contaminante dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)**

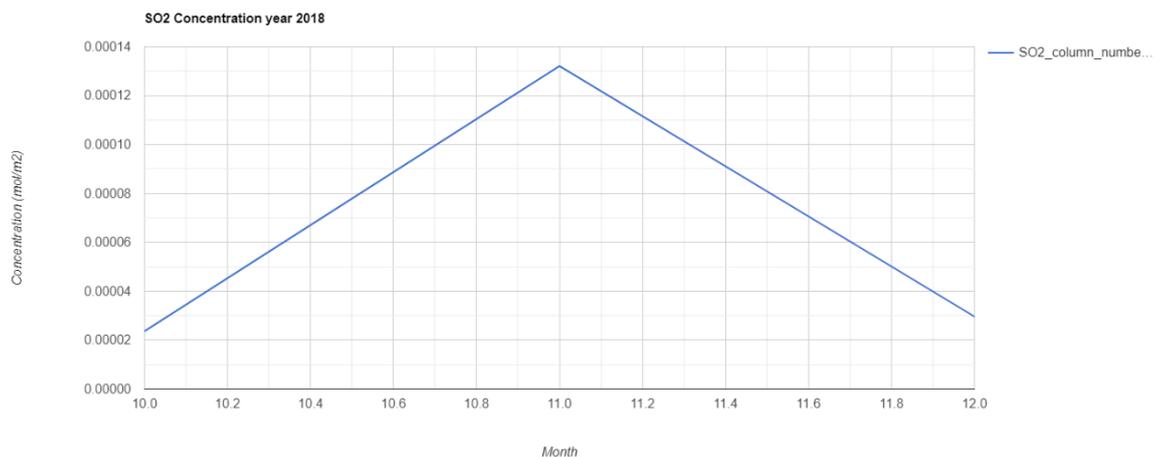
Este conjunto de datos de Sentinel-5P NRTI SO<sub>2</sub>: Near Real-Time Sulfur Dioxide, proporciona imágenes de alta resolución en tiempo casi real de las concentraciones atmosféricas de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).

El contaminante dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) cuando entra en la atmósfera del aire debido a los procesos naturales y antropogénicos, juega un papel importante en la química, su impacto generado alcanza niveles de

contaminación a corto plazo, estos afectan al clima. Sólo alrededor del 30% del  $\text{SO}_2$  emitido procede de fuentes naturales; la mayor parte es de origen antropogénico. Las emisiones de  $\text{SO}_2$  afectan negativamente a la salud humana y a la calidad del aire atmosférico. El  $\text{SO}_2$  tiene un efecto sobre el clima a través del forzamiento radiactivo, mediante la formación de aerosoles de sulfato. Las emisiones volcánicas de  $\text{SO}_2$  también pueden suponer una amenaza para la aviación, junto con las cenizas volcánicas. S5P/TROPOMI muestrea la superficie de la Tierra con un tiempo de revisita de un día y una resolución espacial sin precedentes de  $3,5 \times 7$  km, lo que permite la resolución de detalles finos, incluida la detección de penachos de  $\text{SO}_2$  mucho más pequeños” (European Unión/ESA/Copernicus, 2018).

#### Figura 26

*Series de tiempo del contaminante ( $\text{SO}_2$ ) dióxido de azufre periodo 2018*



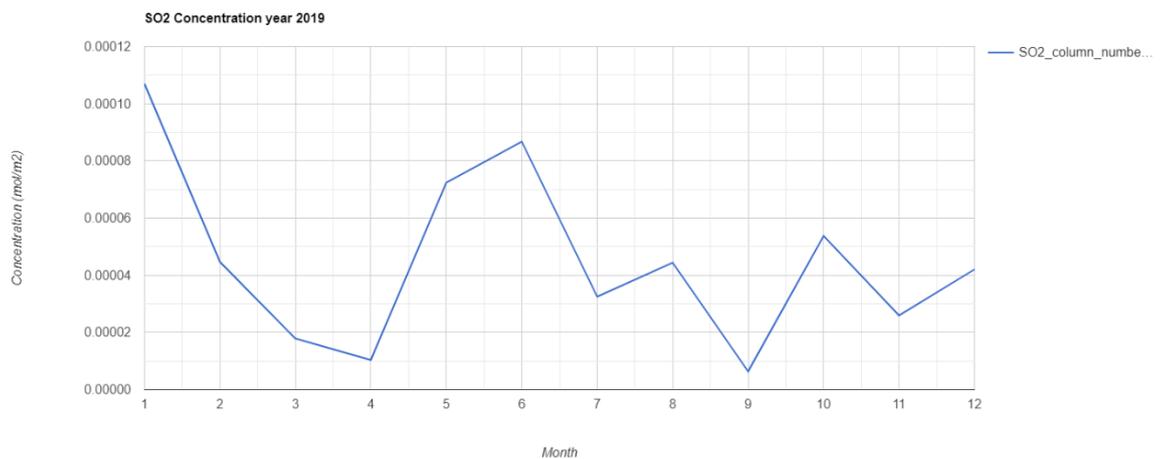
*Nota.* El gráfico muestra la serie de tiempos del contaminante ( $\text{SO}_2$ ) dióxido de azufre periodo 2018

Para la simulación de series de tiempo de la figura 26 del contaminante dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) periodo 2018, se tiene un valor máximo que llega a

0.00013 mol/m<sup>2</sup> y la tendencia más baja corresponde al mes de abril cuyo valor es de 0.000034 mol/m<sup>2</sup>, que corresponde a las provincias de Antabamba, Cotabambas, Grau y Aymaraes.

**Figura 27**

*Series de tiempo del contaminante (SO<sub>2</sub>) dióxido de azufre periodo 2019*

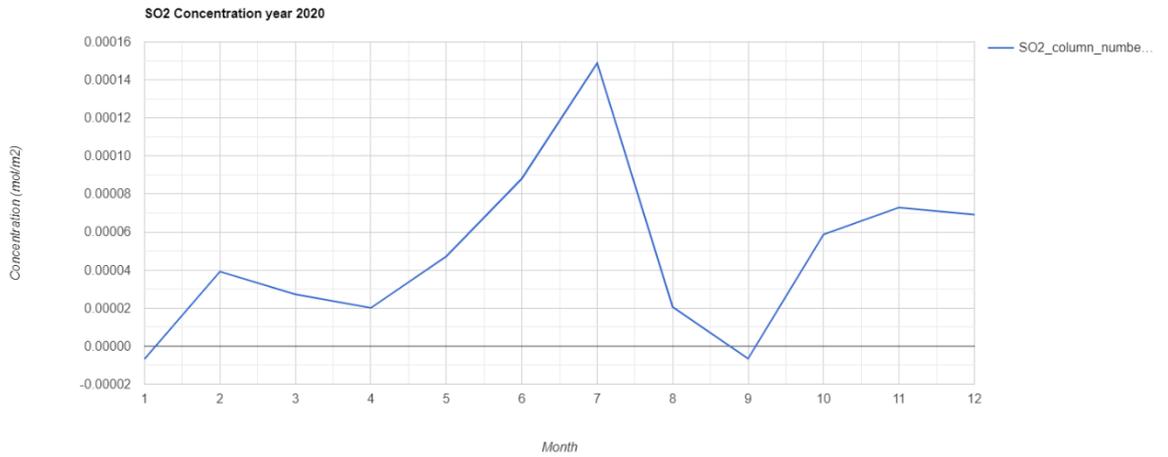


*Nota.* El gráfico muestra la serie de tiempos del contaminante (SO<sub>2</sub>) dióxido de azufre periodo 2019

En la simulación de series de tiempo de la figura 27 del contaminante dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) periodo 2019, se tiene un valor máximo en el mes de junio que llega a 0.00009 mol/m<sup>2</sup>, corresponde a las provincias de Chicheros, Andahuaylas y Abancay, los puntos más bajos corresponde al mes de setiembre cuyo valor es de 0.00001 mol/m<sup>2</sup>. Estos corresponden a las provincias de Antabamba, Cotabambas, Grau y Aymaraes.

## Figura 28

*Series de tiempo del contaminante (SO<sub>2</sub>) dióxido de azufre periodo 2020*

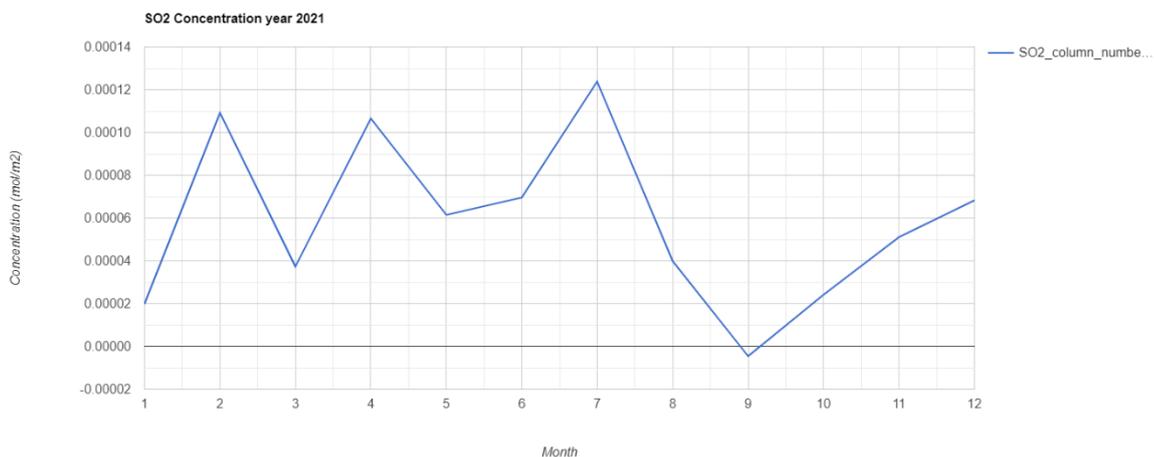


*Nota.* El gráfico muestra la serie de tiempos del contaminante (SO<sub>2</sub>) dióxido de azufre periodo 2020

En la simulación de series de tiempo de la figura 28 del contaminante dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) periodo 2020, tiene un valor máximo en el mes de julio que llega a 0.00015 mol/m<sup>2</sup>, corresponde a la provincia de Abancay, los niveles más bajos corresponden al mes de setiembre cuyo valor es de - 0.00001 mol/m<sup>2</sup>. para las provincias de Antabamba, Cotabambas, Grau y Aymaraes.

**Figura 29**

*Series de tiempo del contaminante (SO<sub>2</sub>) dióxido de azufre periodo 2021*



*Nota.* El gráfico muestra la serie de tiempos del contaminante (SO<sub>2</sub>) dióxido de azufre periodo 2021

En la figura 29 se ha simulado el modelamiento de las concentraciones registradas para el contaminante dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), de la región de Apurímac para año 2021, se muestra diferentes valores de concentraciones de SO<sub>2</sub> dentro del área de estudio, como se puede observar en la simulación de modelamiento las concentraciones mínimas y máximas formadas mensualmente, se presenta que las concentraciones más altas se registraron en los meses de febrero, marzo y julio, siendo el valor máximo registrado en el mes de julio de 0.00012 mol/m<sup>2</sup>.

### 4.3 Discusión

Una de las principales limitaciones de esta investigación fue la falta de estudios previos de la concentración de contaminantes a nivel regional y a nivel local, puesto que se están realizando trabajos, estudios medioambientales empleado imágenes

satelitales del Sentinel – 5P, uno de los problemas es la no existencia de trabajos a nivel regional sobre contaminantes atmosféricos, también podemos mencionar la nubosidad que se presenta en algunas zonas porque limitan la visibilidad, entre otros. Otra de las limitaciones fue la falta de datos disponibles, de la estación meteorológica de la ciudad de Abancay para el monitoreo terrestre para calidad de aire.

De los resultados obtenidos según el requerimiento de esta investigación, utilizando las imágenes de satélite Sentinel - 5P, con la integración de los programas como ArcGis, permitieron obtener las concentraciones de contaminantes más esenciales como el CO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>, indicando las concentraciones máximas y las mínimas en mol/m<sup>2</sup>, logrando así realizar la simulación de la calidad de aire de la región de Apurímac durante el año 2018 al 2021.

## **CAPITULO V: SUGERENCIA**

### **5.1 Sugerencias**

Para el trabajo de investigación, se utilizaron datos confiables de imágenes de satélite extraída del Satélite Sentinel - 5P, el cual admitió obtener las concentraciones de contaminantes anuales de los contaminantes atmosféricos CO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>, donde fueron procesados en la plataforma Google Earth Engine, aplicando para el procesamiento el lenguaje JavaScript, estas imágenes son de uso gratuito en online con fines de investigación del medio ambiente, están disponibles para usuarios de todo el mundo, así mismo se utilizó el software ArcGis, que permitió realizar la información de los niveles de contaminación atmosférica en la región de Apurímac.

Las sugerencias que se puede realizar es hacer estudios constantes con imágenes de alta resolución que nos permita ver el incremento y/o la disminución de la generación de los contaminantes que se producen por diversas acciones del hombre, con la mentalidad de disminuir la generación de contaminantes y tomar medidas preventivas por las autoridades a nivel mundial.

## Conclusiones

Los resultados procesados en la plataforma de Google Earth Engine mediante los algoritmos de JavaScript a través de las imágenes de Satélite Sentinel-5P juntamente con el programa ArcGis, dieron resultados óptimos de los contaminantes del aire atmosféricos CO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>, proporcionando las concentraciones máximas y mínimas en unidades de mol/m<sup>2</sup>, realizando la simulación de la calidad de aire de la región de Apurímac durante el periodo 2018 al 2021.

Los resultados de concentración de contaminantes en la región de Apurímac se muestran en el presente trabajo de investigación, donde se presenta que el contaminante de monóxido de carbono (CO) en el periodo de estudio llegan a niveles máximos de 0.0236 – 0.0284 mol/m<sup>2</sup> las provincias de Chincheros y Abancay correspondientes a los años 2019 y 2020, niveles bajos en el año 2018 de 0.0136 - 0.0160 mol/m<sup>2</sup> en las provincias de Aymaraes, Antabamba y Grau, por otro lado el contaminante dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en el periodo de simulación llegan a niveles altos de 0.000044 – 0.000046 mol/m<sup>2</sup> en los años 2020 y 2021 las provincias de Cotabambas, Andahuaylas y Abancay, así mismo los resultados en la simulación del contaminante atmosférico dióxido de sulfuro (SO<sub>2</sub>), los niveles altos se presentan los años 2020 y 2021 en las provincias de Antabamba, Cotabambas, Aymaraes y Grau a valores de 0.000161 – 0.000247 mol/m<sup>2</sup>.

El estudio también analiza la variabilidad de los contaminantes realizadas en los periodos establecidos presentando series de tiempo de cada contaminante, los resultados de Sentinel-5P en las observaciones de monóxido de carbono (CO), presentan concentraciones máximas que alcanzan a niveles de 0.027 mol/m<sup>2</sup> corresponden al mes de setiembre en los cuatro periodos, los niveles mínimos se

presentan en los meses de mayo, junio y julio alcanzando valores hasta  $0.016 \text{ mol/m}^2$ , los análisis de  $\text{NO}_2$ , para valores máximos son los meses de agosto y setiembre que alcanza valores de  $0.000045$  a  $0.000047 \text{ mol/m}^2$ , niveles bajos en los meses marzo, abril, mayo y julio con valores que oscilan entre  $0.000034$  -  $0.000038 \text{ mol/m}^2$ , el contaminante se observan puntos máximos en los meses de junio, julio agosto y noviembre cuyos valores están entre  $0.0009$  a  $0.00015 \text{ mol/m}^2$ , por otra parte se tiene valores mínimos negativos de  $0.00001 \text{ mol/m}^2$  en los meses de abril y setiembre en el periodo de estudio.

## **Recomendaciones**

Se debe crear e implementar planes de control del manejo de la calidad del aire en la Región de Apurímac, en miras de reducir las concentraciones que estén por encima del nivel permitido que rige el Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM donde Aprueban los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para el Aire y estableciendo Disposiciones Complementarias.

Para reducir las emisiones de CO, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> y otros contaminantes tóxicos, es necesario desarrollar formas de energía más limpias y ecológicas, como la energía solar como la energía solar con paneles fotovoltaicos, reducir la quema de bosques entre otras acciones para cuidar el aire atmosférico que respira la población mundial.

Implementar políticas orientadas a la reducción de la generación de contaminantes ambientales, debido a que afecta en forma directa a la salud de la población, con lo que se puede hacer una política de control de calidad ambiental, establecer compromisos institucionales a nivel global, regional, nacional y local, sobre lo nocivo que es la contaminación atmosférica.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abad, L., & Mejía-Coronel, D. (2017). Estimación de la concentración de material particulado menor a 10 micras a través de sensores remotos en el área Urbana de la ciudad de Cuenca. *Congreso Anual de Meteorología y Calidad Del Aire CAMCA 2017*, 381–390.
- Alejo, D., Morales, M., Van, P., De la Torre, J., Quintero, H., Sosa, D., & Nuñez, V. (2011). Cuantificación De Dióxido De Nitrógeno Con Captadores Pasivos Tipo Radiello. *Revista Cubana de Química*, XXIII(2), 66–71.
- Alvarado, Z. X. (2006). Impacto en la salud ambiental por efecto de emisiones de dióxido de azufre del Volcán Arenal, en la población de la Fortuna de San Carlos. [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S1409-14292006000200004&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S1409-14292006000200004&script=sci_arttext), 15(Rev. costarric. salud pública vol.15 n.29 San José Dec. 2006), 25–34. <https://doi.org/ISSN 1409-1429>
- Baldasano, J. M. (2020). COVID-19 lockdown effects on air quality by NO<sub>2</sub> in the cities of Barcelona and Madrid (Spain). *Science of the Total Environment*, 741(2). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140353>
- Ballester, F. (2005). CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA, CAMBIO CLIMÁTICO Y SALUD. In Rev Esp Salud Pública 2005 (Ed.), *Unidad de Epidemiología y Estadística. Escuela Valenciana de Estudios para la Salud* (Nº 2, pp. 159–175).
- Barriga, F., & Hernández, G. (2010). *Estrategias docentes para un aprendizaje significativo: Una interpretación constructivista* (McGraw-Hill. (ed.); 3ªed.).
- Beirle, S., Borger, C., Dörner, S., Li, A., Hu, Z., Liu, F., Wang, Y., & Wagner, T. (2019). Pinpointing nitrogen oxide emissions from space. *Science Advances*, 5(11), 1–7. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax9800>
- Bella, C.M. Di; Posse, G.; Beget, M.E.; Fischer, M.A.; Mari, N.; Veron, S., E., & (2008). (2008). Asociación Española de Ecología Terrestre. *Red de Revistas*

*Científicas de América Latina, El Caribe, España y Portugal, Ecosistema*, 39–52.

Bermejo, F. A., & Buelvas, E. M. (2013). Simulación y validación experimental de la dispersión del monóxido de carbono (CO) generado por una estufa operando en una cocina típica de la ciudad de Barranquilla, Colombia. *Ingenium Revista de La Facultad de Ingeniería*, 14(27), 53. <https://doi.org/10.21500/01247492.1319>

Bermejo Mancera, M. Á. (2011). Métodos estadísticos en series temporales no lineales, con aplicación a la predicción de energía eólica. *Thesis*.

Borsdorff, T., Aan De Brugh, J., Hu, H., Hasekamp, O., Sussmann, R., Rettinger, M., Hase, F., Gross, J., Schneider, M., Garcia, O., Stremme, W., Grutter, M., Feist, Di. G., Arnold, S. G., De Mazière, M., Kumar Sha, M., Pollard, D. F., Kiel, M., Roehl, C., ... Landgraf, J. (2018). Mapping carbon monoxide pollution from space down to city scales with daily global coverage. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(10), 5507–5518. <https://doi.org/10.5194/amt-11-5507-2018>

CARNICER, J. M. (2008). *Contaminación Atmosferica* (E. de N. EOI (ed.); 1st ed). Escuela de Negocios EOI.

Cesaroni, G., Stafoggia, M., Galassi, C., Hilding, A., Hoffmann, B., Houthuijs, D., Ostenson, C., Overvad, K., & Pedersen, N. L. (2014). *Long term exposure to ambient air pollution and incidence of acute coronary events : prospective cohort study and meta-analysis in 11 European cohorts from*. 7412(January), 1–16. <https://doi.org/10.1136/bmj.f7412>

Chambers, C., Raniwala, A., Perry, F., Adams, S., Henry, R. R., Bradshaw, R., & Weizenbaum, N. (2010). FlumeJava. *Proceedings of the 2010 ACM SIGPLAN Conference on Programming Language Design and Implementation - PLDI '10*, 363. <https://doi.org/10.1145/1806596.1806638>

Chang, F., Dean, J., Ghemawat, S., Hsieh, W. C., Wallach, D. A., Burrows, M., & Gruber, R. E. (2006). *Bigtable: A Distributed Storage System for Structured*

*Data.*

Chuvieco, E. (1996). *Fundamentos de Teledetección Espacial* (I. 84-321-3127-X (ed.)).

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O.,

Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>

Earth Engine. (2018). *Earth Engine Data Catalog. Sentinel Collections*. Earth Engine Data Catalog. Sentinel Collections. <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentinel>

Forero Castro, D. D. (2019). *Metodología Para La Incorporación De Datos Del Sensor Tropomi Del Satélite Sentinel 5-P Al Monitoreo De La Calidad*.

Ghemawat, S., Ghibioff, H., & Leung, S.-T. (2003). The Google file system.

*Proceedings of the Nineteenth ACM Symposium on Operating Systems Principles - SOSP '03*, 29. <https://doi.org/10.1145/945445.945450>

Google, E. S. (2016). *Introducción a Google Earth Engine*.

[https://doi.org/www.google.es/intl/es/earth/outreach/tutorials/eartheng\\_gettingstarted](https://doi.org/www.google.es/intl/es/earth/outreach/tutorials/eartheng_gettingstarted).

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017).

Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>

Gualteros, J., Hernandez, D., & Upegui, E. (2020). Monitoreo de co usando sentinel-5p y gee: caso Cundinamarca en tiempos de covid-19. *Tecnología Investigación y Academia*, 8, 8(3), 71–84.

Gutiérrez Oyarce, A., Ferrero, A., Estarlich, M., Esplugues, A., Iñiguez, C., &

- Ballester, F. (2018). Exposure to nitrogen dioxide and respiratory health at 2 years in the INMA-Valencia cohort. *Gaceta Sanitaria*, 32(6), 507–512.  
<https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2017.05.012>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la Investigación* (McGraw-Hill (ed.); 6.a ed).
- Ialongo, I., Virta, H., Eskes, H., Hovila, J., & Douros, J. (2020). Comparison of TROPOMI/Sentinel-5 Precursor NO<sub>2</sub> observations with ground-based measurements in Helsinki. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(1), 205–218. <https://doi.org/10.5194/amt-13-205-2020>
- Ihaka, R. (2005). *Lecture note for Time Series Analysis*.
- JERVES COBO, R., & Armijo Arcos, F. (2016). Análisis y revisión de la red de monitoreo de calidad del aire de la ciudad de Cuenca - Ecuador. *La Granja*, 23(1), 25–34. <https://doi.org/10.17163/lgr.n23.2016.03>
- Lavaine, E. (2014). An Econometric Analysis of Atmospheric Pollution, Environmental Disparities and Mortality Rates. *Springer*, 60(60), 215–242.  
<https://doi.org/10.1007/s10640-014-9765-0>
- Li, Y., Wang, Y., Rui, X., Li, Y., Li, Y., Wang, H., & Jian Zuo & Yindong Tong. (2017). Sources of atmospheric pollution: a bibliometric analysis. *Springer*, 112, 1025–1045.
- Moreno, S. E. (2008). Predicción con series de tiempo y regresión. *Panorama*, 2, 36–58.
- Núñez, V. C., Rojas, R. R., Camacho, L. G., Herrera Moya, I., & Morales Pérez, M. C. (2019). Emisiones de dióxido de azufre a la atmósfera por fuentes jas del MINAG y su inuencia en la calidad del aire en la provincia de Villa Clara Inuence on air quality of sulfur dioxide emissions from xed agricultural sources in Villa Clara. *Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas*, 46(3), 86–95.

- Olmo, N. R. S., Saldiva, P. H. do N., Braga, A. L. F., Lin, C. A., Santos, U. de P., & Pereirai, L. A. A. (2011). A review of low-level air pollution and adverse effects on human health: Implications for epidemiological studies and public policy. *Clinics*, 66(4), 681–690. <https://doi.org/10.1590/S1807-59322011000400025>
- OMS. (2016). *Organizacion Mundial de la Salud*.
- Opio, R., Mugume, I., & Nakatumba-Nabende, J. (2021). Understanding the trend of NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and CO over East Africa from 2005 to 2020. *Atmosphere*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/atmos12101283>
- OPS. (2020). *Panamericana de Salud Pública*.
- Pando, D. (2021). *Evaluación e interpretación de la dinámica del monóxido de carbono en el aire de Lima Este 2019*.
- Paul, I., Veihelmann, B., Langen, J., Lamarre, D., Stark, H., & Courrèges-Lacoste, G. B. (2012). Requirements for the GMES Atmosphere Service and ESA's implementation concept: Sentinels-4/-5 and -5p. *ScienceDirect*, 120, 58–59. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.023>
- Pérez, D. (2007). *Introduccion a los Sensores Remotos Aplicados en Geologia*. 09.
- Perez, L., Declercq, C., Iníguez, C., Aguilera, I., Badaloni, C., Ballester, F., Bouland, C., Chanel, O., Cirarda, F. B., Forastiere, F., Forsberg, B., Haluza, D., Hedlund, B., Cambra, K., Lacasanã, M., Moshammer, H., Otorespec, P., Rodríguez-Barranco, M., Medina, S., & Kuñzli, N. (2013). Chronic burden of near-roadway traffic pollution in 10 European cities (APHEKOM network). *European Respiratory Journal*, 42(3), 594–605. <https://doi.org/10.1183/09031936.00031112>
- Quesada, M. (2011). *Análisis de Series Temporales, Modelos Heterocedástico*. Universidad de Granada, Granada – España.
- Ruiz, F. R. (2017). *Taller 7*. 26, 101–109.

- Senén, G. P. A. · G. F. I. A. · S. G. B. · F. H. P. · G. M. R. M. · B. Y. J. C. · P. P. J. Á. · N. P. R. · D. A. J. (2012). *Contaminación atmosférica* (E. UNED (ed.); Editorial). EDITORIAL UNED.
- Sin, M. (2014). *Intalación y análisis de un sistema de limpieza de gases de escape para un Buque RO-RO* (I. T. NAVAL (ed.)). INGENIERIA TECNICA NAVAL.
- Slama, R., Bottagisi, S., Solansky, I., Lepeule, J., Giorgis-Allemand, L., & Sram, R. (2013). Short-term impact of atmospheric pollution on fecundability. *Epidemiology*, 24(6), 871–879. <https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e3182a702c5>
- Téllez, J. I., & Rodríguez Álvaro Fajardo III I Médico M Sc Toxicología Especialista Salud Ocupacional Especialista Farmacodependencia, A. I. (2006). Contaminación por Monóxido de Carbono: un Problema de Salud Ambiental Ensayo/Essay. In *Rev. salud pública* (Vol. 8, Issue 1).
- Tello et. al. (2021). Análisis de la contaminación ambiental usando técnicas de teledetección y análisis de componentes principales. *TecnoLógicas*, 24(50), e1710. <https://doi.org/10.22430/22565337.1710>
- Theys, N., Hedelt, P., De Smedt, I., Lerot, C., Yu, H., Vlietinck, J., Pedergrana, M., Arellano, S., Galle, B., Fernandez, D., Carlito, C. J. M., Barrington, C., Taisne, B., Delgado-Granados, H., Loyola, D., & Van Roozendael, M. (2019). Global monitoring of volcanic SO<sub>2</sub> degassing with unprecedented resolution from TROPOMI onboard Sentinel-5 Precursor. *Scientific Reports*, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39279-y>
- Veefkind et. al. (2017). Early Results from TROPOMI on the Copernicus Sentinel 5 Precursor. *American Geophysical Union, Fall Meeting 2017, Abstract #A52A-08*.
- Venegas y Mazzeo, L. N. (2012). Evaluación del desempeño de modelos de dispersión de contaminantes aplicados a cañones urbanos. *Scielo.Org.Art*, Vol. 37 N°. <https://doi.org/Manuscrito>

Venturino, R., Schall, U. M., & Solichin, U. J. (2014). *Google Earth Engine As a Remote Sensing Tool. International Journal of Remote Sensing & Geoscience.*

Verma, A., Pedrosa, L., Korupolu, M., Oppenheimer, D., Tune, E., & Wilkes, J. (2015). Large-scale cluster management at Google with Borg. *Proceedings of the Tenth European Conference on Computer Systems*, 1–17.  
<https://doi.org/10.1145/2741948.2741964>

Virghileanu, M., Săvulescu, I., Mihai, B. A., Nistor, C., & Dobre, R. (2020). Nitrogen dioxide (No<sub>2</sub>) pollution monitoring with sentinel-5p satellite imagery over europe during the coronavirus pandemic outbreak. *Remote Sensing*, 12(21), 1–29.  
<https://doi.org/10.3390/rs12213575>

Zeng, J., Vollmer, B. E., Ostrenga, D. M., Gerasimov, I. V., Goddard, N., & Flight, S. (2019). *Air Quality Satellite Monitoring by TROPOMI on Sentinel-5P*. 2, 10500849.

## ANEXOS

### ANALISIS DE CONTAMINANTES DE (CO) MOXIDO DE CARBONO

#### AÑO 2018

#### SCRIPT

```
Map.addLayer(table)

//Datos Sentinel 5P para CO
var C0 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_CO')
.filterDate('2018-06-28', '2018-12-31'); //Selección de periodo temporal

//Datos para columna CO
var SentinelCO = C0
    .select('CO_column_number_density')
    .filterBounds (table);

var COData = ee.Image(SentinelCO.median());
var COClip = COData.clip (table);
Map.addLayer (COClip, {
    max: 0.0002,
    min: 0.0,

    palette: ["black", "blue", "purple", "cyan", "green", "yellow", "red"]},
    'CO');

print(SentinelCO.size());

//Poner todas las fechas en una lista
var dates = ee.List(SentinelCO.aggregate_array("system:time_start"))
```

```

        .map(function(d) { return ee.Date(d)});

// Imprimir una lista con fechas

print(dates);

Export.image.toDrive({
  image:COClip.select("CO_column_number_density"),
  description: "CO",
  scale: 1100,
  region: table});

//Definir el titulo

var TituloMapa = ui.Label({
  value: 'CONTAMINANTE DE CO AÑO 2018', // Titulo del mapa
  style: {position: 'top-center', // Posicion
  fontWeight: 'bold', // Negrita
  fontSize: '15px'}}); // Tamaño de fuente

//Incorporar el titulo en el visor

Map.add(TituloMapa);

// Posiciones del Titulo

//'top-left'

//'top-center'

//'top-right'

//'middle-left'

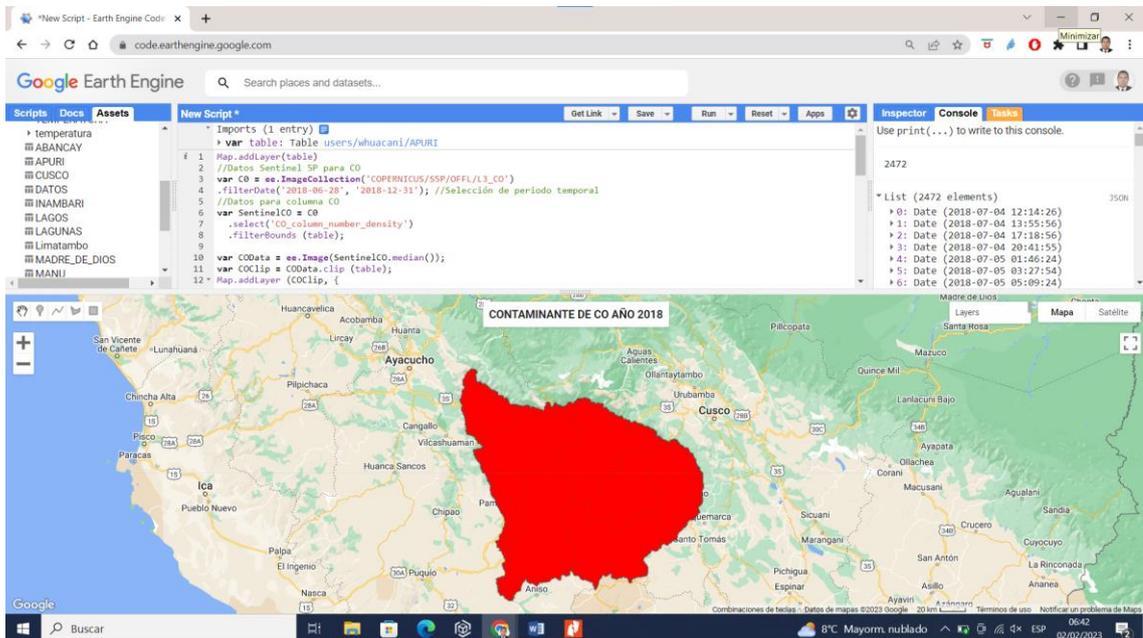
//'middle-right'

//'bottom-left'

```

```
//'bottom-center'
```

```
//'bottom-right'
```



## ANALISIS DE CONTAMINANTES DE (NO<sub>2</sub>) DIOXIDO DE NITROGENO

**AÑO 2020**

**SCRIPT**

```
Map.addLayer(table)
```

```
//Datos Sentinel 5P para NO2
```

```
var N02 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_NO2')
```

```
.filterDate('2020-01-31', '2020-12-31'); //Selección de periodo temporal
```

```
//Datos para columna NO2 Total
```

```
var SentinelNO2Total = N02
```

```
.select('NO2_column_number_density')
```

```

.filterBounds (table);

var NO2TotalData = ee.Image(SentinelNO2Total.median());

var NO2TotalClip = NO2TotalData.clip (table);

Map.addLayer (NO2TotalClip, {
  max: 0.0002,
  min: 0.0,
  palette: ["black", "blue", "purple", "cyan", "green", "yellow", "red"]},
'NO2 Total');

Export.image.toDrive({
  image: NO2TotalClip.select("NO2_column_number_density"),
  description: 'NO2_Total',
  scale: 1100,
  region: table});

//Datos para columna NO2 Troposferico

var SentinelNO2Tropo = N02
  .select('tropospheric_NO2_column_number_density')
  .filterBounds (table);

var NO2TropoData = ee.Image(SentinelNO2Tropo.median());

var NO2TropoClip = NO2TropoData.clip (table);

Map.addLayer (NO2TropoClip, {
  max: 0.0002,
  min: 0.0,
  palette: ["black", "blue", "purple", "cyan", "green", "yellow", "red"]},
'NO2 Troposférico');

Export.image.toDrive({

```

```

image: NO2TropoClip.select("tropospheric_NO2_column_number_density"),
description: 'NO2_Troposferico',
scale: 1100,
region: table});

//Datos para columna NO2 Estratosferico
var SentinelNO2Estr = N02
  .select('stratospheric_NO2_column_number_density')
  .filterBounds (table);

var NO2EstrData = ee.Image(SentinelNO2Estr.median());
var NO2EstrClip = NO2EstrData.clip (table);

Map.addLayer (NO2EstrClip, {
  max: 0.00005,
  min: 0.0,
  palette: ["black", "blue", "purple", "cyan", "green", "yellow", "red"]},
  'NO2 Estratosférico');

Export.image.toDrive({
  image: NO2EstrClip.select("stratospheric_NO2_column_number_density"),
  description: 'NO2_Estratosferico',
  scale: 1100,
  region: table});

//Definir el titulo
var TituloMapa = ui.Label({
  value: 'CONTAMINANTE DE NO2 AÑO 2020', // Titulo del mapa
  style: {position: 'top-center', // Posicion

```

```
fontWeight: 'bold', // Negrita
fontSize: '15px'}}); // Tamaño de fuente
```

```
//Incorporar el titulo en el visor
```

```
Map.add(TituloMapa);
```

```
// Posiciones del Titulo
```

```
//'top-left'
```

```
//'top-center'
```

```
//'top-right'
```

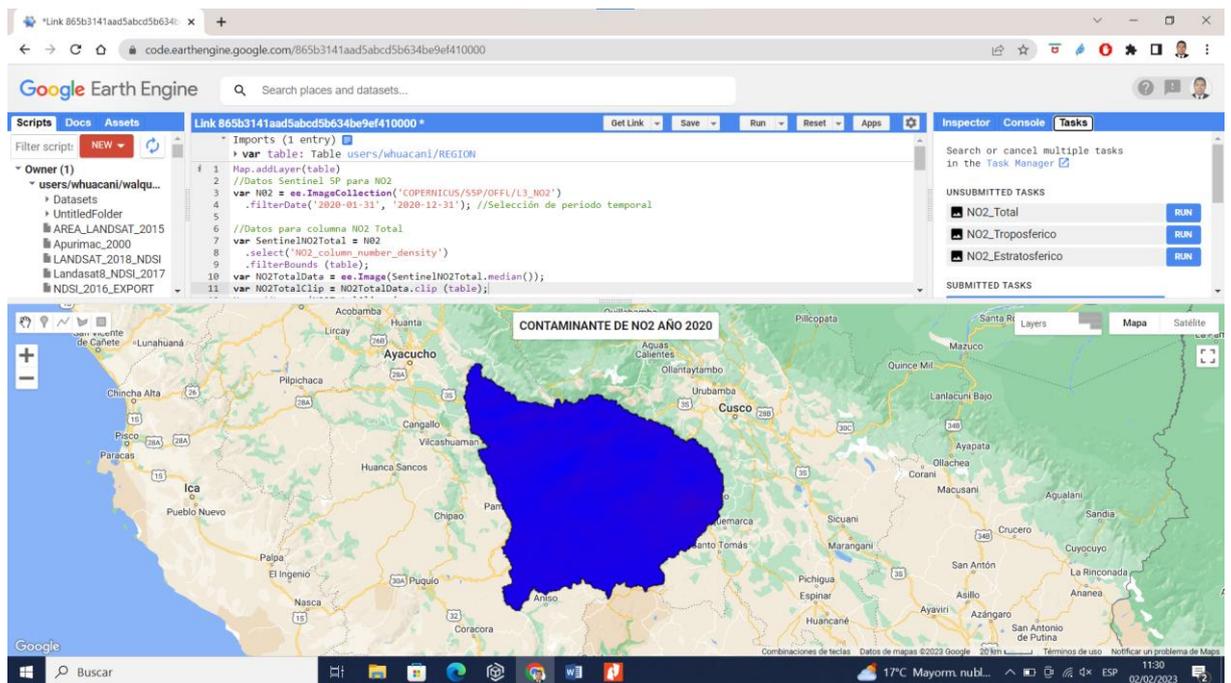
```
//'middle-left'
```

```
//'middle-right'
```

```
//'bottom-left'
```

```
//'bottom-center'
```

```
//'bottom-right'
```



## ANALISIS DE CONTAMINANTES DE (SO<sub>2</sub>) DIOXIDO DE SULFURO

**AÑO 2021**

### SCRIPT

```
Map.addLayer(table)

//Datos Sentinel 5P para SO2

var SO2 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_SO2')

.filterDate('2021-01-01', '2021-12-31'); //Selección de periodo temporal

//Datos para columna SO2

var SentinelSO2 = SO2

.select('SO2_column_number_density')

.filterBounds (table);

var SO2Data = ee.Image(SentinelSO2.median());

var SO2Clip = SO2Data.clip (table);

Map.addLayer (SO2Clip, {

  max: 0.0002,

  min: 0.0,

  palette: ["black", "blue", "purple", "cyan", "green", "yellow", "red"]},

'SO2');

print(SentinelSO2.size());

//Poner todas las fechas en una lista

var dates = ee.List(SentinelSO2.aggregate_array("system:time_start"))

.map(function(d) { return ee.Date(d)});
```

```

// Imprimir una lista con fechas
print(dates);

Export.image.toDrive({
  image:SO2Clip.select("SO2_column_number_density"),
  description: "SO2",
  scale: 1100,
  region: table});

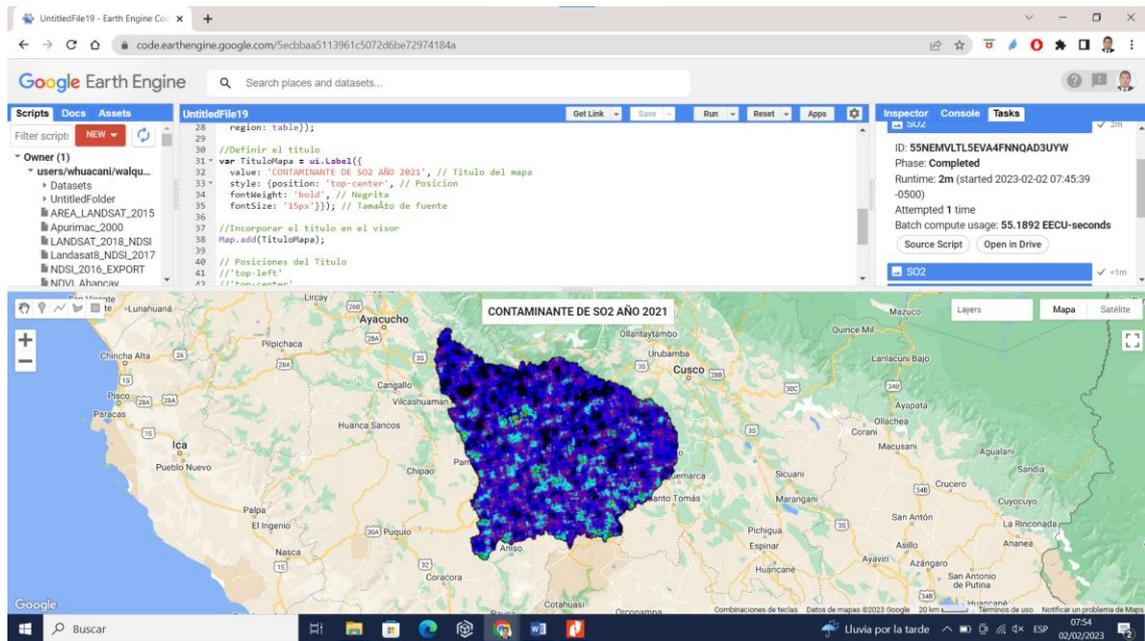
//Definir el titulo
var TituloMapa = ui.Label({
  value: 'CONTAMINANTE DE SO2 AÑO 2021', // Titulo del mapa
  style: {position: 'top-center', // Posicion
  fontWeight: 'bold', // Negrita
  fontSize: '15px'}}); // Tamaño de fuente

//Incorporar el titulo en el visor
Map.add(TituloMapa);

// Posiciones del Titulo
//'top-left'
//'top-center'
//'top-right'
//'middle-left'
//'middle-right'
//'bottom-left'
//'bottom-center'

```

//'bottom-right'



## ANALISIS DE SERIES DE TIEMPO DE (CO) MONOXIDO DE CARBONO

**AÑO 2019**

### SCRIPT

```
Map.addLayer(table)
```

```
var date_1 = "2019-01-01"
```

```
var date_2 = "2019-12-31"
```

```
var col = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_CO")
```

```
.filterBounds(table)
```

```
.filterDate(date_1,date_2)
```

```
.select("CO_column_number_density")
```

```
.map(function(a) {
```

```

return a.set("month", ee.Image(a).date().get("month"))

})

// print (col)

var months = ee.List(col.aggregate_array("month")).distinct()

// print(months)

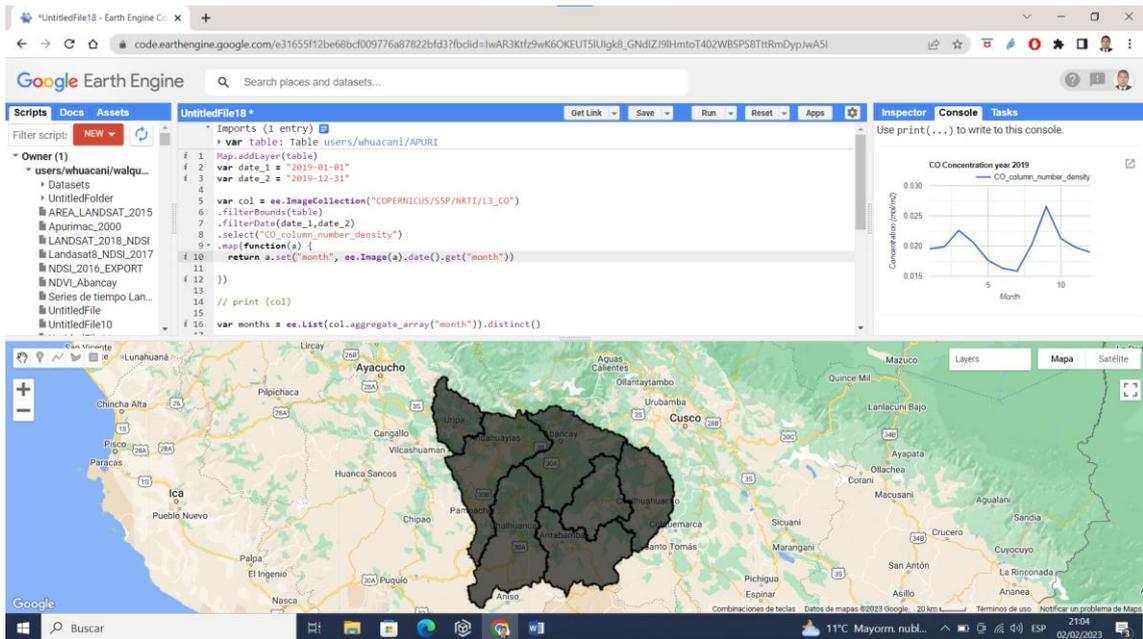
var mc = months.map(function(x){
  return col.filterMetadata("month", "equals", x).mean().set("month", x)
})

var final_image = ee.ImageCollection.fromImages(mc)

var chart = ui.Chart.image.series(final_image,
table,ee.Reducer.mean(),5000,"month")
.setOptions({
  title: "CO Concentration year 2019",
  vAxis: {title:"Concentration (mol/m2) "},
  hAxis: {title: "Month"}
})

print(chart)

```



## SERIES DE TIEMPO DE CONTAMINANTE DIOXIDO DE NITROGENO (NO2)

**AÑO 2019**

### SCRIPT

Map.addLayer(table)

var date\_1 = "2019-01-01"

var date\_2 = "2019-12-31"

var col = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S5P/NRTI/L3\_NO2")

.filterBounds(table)

.filterDate(date\_1, date\_2)

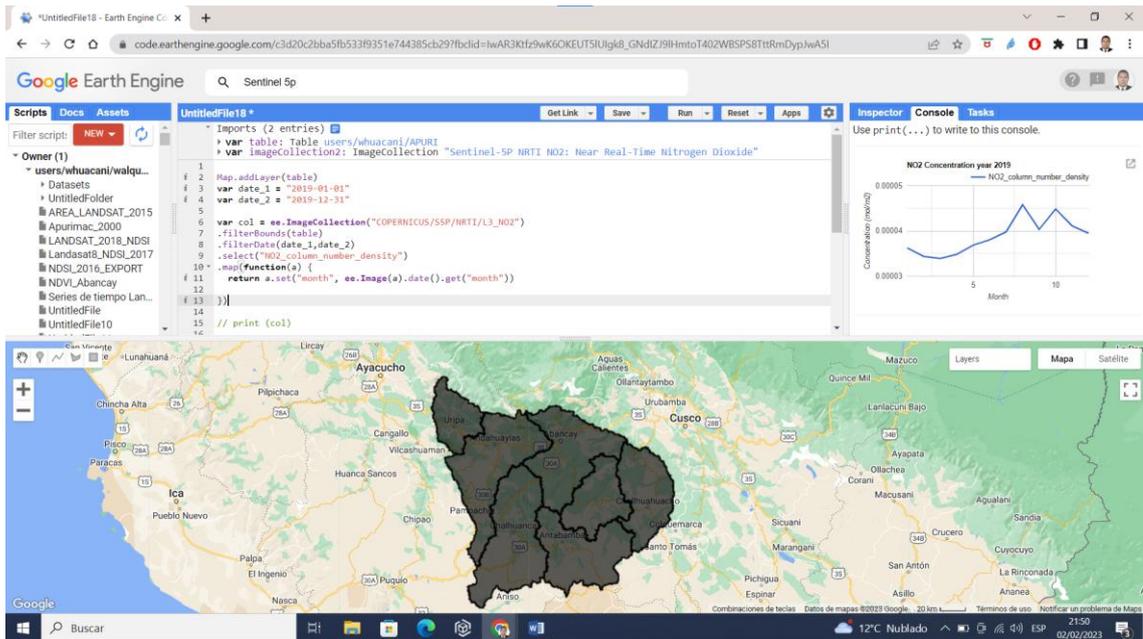
```

.select("NO2_column_number_density")

.map(function(a) {
  return a.set("month", ee.Image(a).date().get("month"))
})

// print (col)
var months = ee.List(col.aggregate_array("month")).distinct()
// print(months)
var mc = months.map(function(x){
  return col.filterMetadata("month", "equals", x).mean().set("month", x)
})
var final_image = ee.ImageCollection.fromImages(mc)
var chart = ui.Chart.image.series(final_image,
table,ee.Reducer.mean(),5000,"month")
.setOptions({
  title: "NO2 Concentration year 2019",
  vAxis: {title:"Concentration (mol/m2) "},
  hAxis: {title: "Month"}
})
print(chart)

```



## SERIES DE TIEMPO DE CONTAMINANTE DIOXIDO DE AZUFRE (SO2)

**AÑO 2019**

### SCRIPT

Map.addLayer(table)

var date\_1 = "2019-01-31"

var date\_2 = "2019-12-31"

var col = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S5P/NRTI/L3\_SO2")

.filterBounds(table)

.filterDate(date\_1,date\_2)

.select("SO2\_column\_number\_density")

.map(function(a) {

```

return a.set("month", ee.Image(a).date().get("month"))

})

// print (col)

var months = ee.List(col.aggregate_array("month")).distinct()

// print(months)

var mc = months.map(function(x){
  return col.filterMetadata("month", "equals", x).mean().set("month", x)
})

var final_image = ee.ImageCollection.fromImages(mc)

var chart = ui.Chart.image.series(final_image,
table,ee.Reducer.mean(),5000,"month")
.setOptions({
  title: "SO2 Concentration year 2019",
  vAxis: {title:"Concentration (mol/m2) "},
  hAxis: {title: "Month"}
})

print(chart)

```

Google Earth Engine interface showing a script for processing Sentinel-5P NRTI SO2 data for the year 2019. The script is titled "Sentinel-5P NRTI SO2: Near Real-Time Sulphur Dioxide".

```

1 Imports (2 entries)
2 var table: Table users/whuacani/APURU
3 var imageCollection: ImageCollection "Sentinel-5P NRTI SO2: Near Real-Time Sulphur Dioxide"
4
5 Map.addLayer(table)
6 var date_1 = "2019-01-31"
7 var date_2 = "2019-12-31"
8
9 var col = ee.ImageCollection("COPERNICUS/SSP/NRTI/L3_SO2")
10 .filterBounds(table)
11 .filterDate(date_1, date_2)
12 .select("SO2_column_number_density")
13 .map(function(a) {
14   return a.set("month", ee.Image(a).date().get("month"));
15 })
16 // print(col)

```

The Inspector panel shows a line graph titled "SO2 Concentration year 2019" with the y-axis labeled "Concentration (ppb)" ranging from 0.00000 to 0.00015 and the x-axis labeled "Month" ranging from 0 to 10. The graph shows a fluctuating line representing the SO2 concentration over the year.

The map displays the geographical context of the data, showing the regions of Ayacucho and Cusco in Peru. The map includes labels for various cities and regions, such as Ayacucho, Cusco, and Ica. The interface also shows the Google Earth Engine logo and navigation controls.