



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera Ingeniería Ambiental

“Análisis de comparación de datos de contaminantes atmosféricos: CO, SO₂, NO₂, O₃, CH₂O entre Sentinel 5P y productos satelitales de OMI, MERRA-2 y AIRS en Ecuador”

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

Autores:

César Israel Padrón Crespo

CI:0105687248

israel.padron.crespo@gmail.com

Carlos Xavier Cabrera Carrión

CI: 0106219892

carl10cab@hotmail.com

Director:

Blgo. Julio Danilo Mejía Coronel, MSc.

CI: 0103638581

Cuenca - Ecuador

18 de marzo de 2022



Resumen:

La contaminación atmosférica es un problema ambiental causado por gases emitidos principalmente por actividades antropogénicas. La exposición de las personas a estos contaminantes afecta en su mayoría al sistema respiratorio y circulatorio. Por lo tanto es necesario hacer estudios sobre la variabilidad y la concentración de los contaminantes para predecir su comportamiento y tomar acciones futuras.

El presente estudio analiza estadísticamente la calidad de los datos de los contaminantes atmosféricos CO, SO₂, NO₂, O₃ y CH₂O medidos por el satélite Sentinel 5P (Sensor TROPOMI) con respecto a las mediciones proporcionados por los sensores antecesores (MERRA-2, OMI y AIRS) en la República del Ecuador desde enero del 2019 hasta diciembre del 2020. La metodología realiza un resample o modificación del tamaño de pixel igualando la resolución espacial de los diferentes para el posterior análisis estadístico. Se obtuvo como valor de coeficiente R² positivo para el O₃ para AIRS Y MERRA-2. Para los demás contaminantes analizados se obtuvieron coeficientes de determinación que no representan una correlación entre los productos satelitales y Sentinel 5P.

Para un mejor análisis se utilizaron datos de estaciones en tierra ubicadas en las ciudades de Cuenca y Quito, determinando de esta manera una relación positiva para todos los contaminantes tratados con los diferentes productos satelitales, es decir, los datos que se obtienen en tierra tienen incidencia con lo que se obtiene en las imágenes satelitales. Posteriormente realizaron gráficos de series de tiempo para identificar valores atípicos, cambios repentinos, patrones estacionales, tendencias, etc. Además se realizó un resample a diferente tamaño de pixel para contrastarlo con el realizado en principio, y se determinó que Sentinel 5P explica de mejor manera las concentraciones de los demás productos satelitales.

Palabras clave: Contaminantes atmosféricos. Sentinel 5P. Resample.



Abstract:

Air pollution is an environmental problem caused by gases emitted mainly by anthropogenic activities. The exposure of people to these pollutants mainly affects the respiratory and circulatory systems. Therefore, it is necessary to carry out studies on the conservation and concentration of pollutants to predict their behavior and take future actions.

The present study statistically analyzes the quality of the data of atmospheric pollutants CO, SO₂, NO₂, O₃ and CH₂O measured by the Sentinel 5P satellite (TROPOMI Sensor) with respect to those equipped by the predecessor sensors (MERRA-2, OMI and AIRS).) in the Republic of Ecuador from January 2019 to December 2020. The methodology performs a resampling or modification of the pixel size, matching the spatial resolution of the different ones for subsequent statistical analysis. It was obtained as a positive R² coefficient value for O₃ for AIRS and MERRA-2. For the other pollutants analyzed, determination coefficients were acquired that do not represent a correlation between the satellite products and Sentinel 5P.

For a better analysis, data from ground stations located in the cities of Cuenca and Quito were used, thus determining a positive relationship for all the pollutants treated with the different satellite products, that is, the data obtained on the ground have an incidence with what is obtained in the satellite images. Subsequently, time series graphs were made to identify outliers, sudden changes, seasonal patterns, trends, etc. In addition, a resampling of a different pixel size was carried out to contrast it with the one carried out in principle, and it was determined that Sentinel 5P better explains the concentrations of the other satellite products.

Keywords: Air pollutants. Sentinel 5P. Resample.



Índice del Trabajo

1. INTRODUCCIÓN.....	16
2. ESTADO DEL ARTE.....	18
3. OBJETIVOS.....	20
3.1 Objetivo general.....	20
3.2 Objetivos específicos.....	20
4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	21
4.1 Teledetección.....	21
4.2 Sensores remotos.....	21
4.2.1 Tipos de sensores remotos.....	22
4.2.2 Características.....	22
4.2.3 Tipos de Resolución.....	23
4.3 Sentinel 5P (Sensor TROPOMI).....	23
4.4 Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2).....	24
4.5 Ozone Monitoring Instrument (OMI).....	24
4.6 Atmospheric Infrared Sounder (AIRS).....	24
4.7 Contaminación atmosférica.....	24
4.8 Contaminantes atmosféricos.....	25
4.8.1 Monóxido de carbono (CO).....	25
4.8.2 Dióxido de nitrógeno (NO ₂).....	26
4.8.3 Ozono (O ₃).....	27
4.8.4 Dióxido de azufre (SO ₂).....	27
4.8.5 Formaldehído (CH ₂ O).....	28
4.9 Sistemas de información geográfica.....	28



4.9.1 Aplicaciones de Sistemas de Información Geográfica.....	29
4.10 Método de interpolación de datos: Ponderación de Distancia Inversa (IDW) en SIG	30
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	31
5.1 Área de estudio	31
5.2 Obtención de datos satelitales.....	32
5.3 Pre-procesamiento de datos de los productos satelitales	34
5.4 Relación de datos satelitales con estaciones de tierra.....	36
5.5 Conversión de unidades de la base de datos	38
5.6 Análisis de parámetros estadísticos	40
5.6.1 Diagramas de caja	40
5.6.2 Análisis de correlación mediante regresión lineal.....	40
5.6.3 Diferencias de concentraciones	41
5.7 Series de tiempo.....	41
5.8 Mapas de concentración anual	41
5.9 Análisis de correlación con diferente tamaño de pixel	42
6. RESULTADOS.....	43
6.1 Análisis de correlación de CO, NO ₂ , O ₃ y SO ₂ con estaciones de tierra	43
6.2 Resultados de parámetros estadísticos	44
6.2.1 Diagramas de caja	44
6.2.2 Análisis de correlación mediante regresión lineal entre Sentinel 5P (Sensor TROPOMI) con OMI, MERRA-2 y AIRS	48
6.2.3 Resultados de diferencias de concentraciones	50
6.3 Series de tiempo.....	53
6.4 Mapas de concentración anual	58
6.5 Resultado de análisis de correlación con diferente tamaño de pixel	61



7. DISCUSIÓN.....	63
8. CONCLUSIONES.....	68
9. RECOMENDACIONES.....	69
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
11. ANEXOS	79

Índice de Figuras

Figura 1. Área de estudio.....	31
Figura 2. Esquema metodológico del pre procesamiento de las imágenes.	35
Figura 3. Estaciones ubicadas en la ciudad de Cuenca.....	37
Figura 4. Estaciones ubicadas en la ciudad de Quito	37
Figura 5. Esquema metodológico del resample de las imágenes de Sentinel 5P.	42
Figura 6. Diagrama de caja de la base de datos de O ₃	44
Figura 7. Diagrama de caja de la base de datos de CO.	45
Figura 8. Diagrama de caja de la base de datos de NO ₂ del satélite Sentinel 5P.	45
Figura 9. Diagrama de caja de la base de datos NO ₂ del satélite OMI.	46
Figura 10. Diagrama de caja de la base de datos de SO ₂ del satélite MERRA-2.....	47
Figura 11. Diagrama de caja de la base de datos de SO ₂ del satélite Sentinel 5P.....	47
Figura 12. Diagrama de caja de la base de datos de CH ₂ O del satélite Sentinel 5P.....	48
Figura 13. Diagrama de caja de la base de datos de CH ₂ O del satélite OMI.	48



Índice de Gráficas

Gráfica 1. Comparación de series de tiempo de O ₃ entre Sentinel 5P, MERRA-2 y AIRS. 53	53
Gráfica 2. Comparación de las series de tiempo de CO entre Sentinel 5P y MERRA-2. 54	54
Gráfica 3. Comparación de serie de tiempo de NO ₂ entre Sentinel 5P y OMI. 55	55
Gráfica 4. Comparación de serie de tiempo de SO ₂ entre Sentinel 5P y MERRA-2. 55	55
Gráfica 5. Serie de tiempo de CH ₂ O de OMI. 56	56
Gráfica 6. Serie de tiempo de CH ₂ O de Sentinel 5P. 57	57
Gráfica 7. Serie de tiempo de CH ₂ O de Sentinel 5P y OMI..... 57	57

Índice de Tablas

Tabla 1. Características de cada satélite y sus formas de medición. 32	32
Tabla 2. Coordenadas geográficas de las estaciones de monitoreo de contaminantes atmosféricos. 37	37
Tabla 3. Conversión de unidades de los diferentes productos satelitales..... 39	39
Tabla 4. Correlación de O ₃ , CO, NO ₂ y SO ₂ entre las estaciones de tierra y los productos satelitales 43	43
Tabla 5. Correlación de los valores de Sentinel 5P con OMI, MERRA-2 y AIRS..... 49	49
Tabla 6. Media, Varianza, Desviación estándar y Coeficientes de variación de las diferencias de concentraciones de los productos satelitales. 53	53
Tabla 7. Correlación de los valores de Sentinel 5P con OMI, MERRA-2 y AIRS aumentando el tamaño de pixel. 62	62



Índice de Mapas

Mapa 1. Diferencia de concentraciones de O ₃ entre (Sentinel 5P y AIRS) y (Sentinel 5P y MERRA-2).	50
Mapa 2. Diferencia de concentraciones CH ₂ O, entre Sentinel 5P y OMI.....	51
Mapa 3. Diferencia de concentraciones CO, entre Sentinel 5P y MERRA-2.	51
Mapa 4. Diferencia de concentraciones NO ₂ , entre Sentinel 5P y OMI.	52
Mapa 5. Diferencia de concentraciones SO ₂ , entre Sentinel 5P y Merra-2.	52
Mapa 6. Concentración promedio de 2019 y 2020 de O ₃ de Sentinel 5P, MERRA-2 y AIRS.	58
Mapa 7. Concentración promedio de 2019 y 2020 de NO ₂ de Sentinel 5P y OMI.....	59
Mapa 8. Concentración promedio de 2019 y 2020 de CO Sentinel 5P y MERRA-2.	59
Mapa 9. Concentración promedio del 2019 y 2020 de SO ₂ de Sentinel 5P y MERRA-2....	60
Mapa 10. Concentración promedio de 2019 y 2020 de CH ₂ O Sentinel 5P y OMI.	61

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Regresión lineal.	40
------------------------------------	----



Índice de Anexos

Anexo 1. Plataforma Google Earth Engine	79
Anexo 2. Plataforma GIOVANNI NASA	79
Anexo 3. Script de programación para descarga de datos de SO ₂ en Google Earth Engine	80
Anexo 4. Script de programación para descarga de datos de NO ₂ en Google Earth Engine	80
Anexo 5. Script de programación para descarga de datos de O ₃ en Google Earth Engine. .	81
Anexo 6. Script de programación para descarga de datos de CH ₂ O en Google Earth Engine.	81
Anexo 7. Script de programación para descarga de datos de CO en Google Earth Engine.	82
Anexo 8. Muestra de cien primeros datos de CH ₂ O.....	83
Anexo 9. Muestra de cien primeros datos de NO ₂	84
Anexo 10. Muestra de cien primeros datos de O ₃	86
Anexo 11. Muestra de cien primeros datos de SO ₂	88
Anexo 12. Muestra de cien primeros datos de CO.....	90



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

César Israel Padrón Crespo en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis de comparación de datos de contaminantes atmosféricos: CO, SO₂, NO₂, O₃, CH₂O entre Sentinel 5P y productos satelitales de OMI, MERRA-2 y AIRS en Ecuador", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

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

Cuenca, 18 de marzo de 2022.

César Israel Padrón Crespo

C.I: 0105687248



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Carlos Xavier Cabrera Carrión en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis de comparación de datos de contaminantes atmosféricos: CO, SO₂, NO₂, O₃, CH₂O entre Sentinel 5P y productos satelitales de OMI, MERRA-2 y AIRS en Ecuador", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

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

Cuenca, 18 de marzo de 2022.

Carlos Xavier Cabrera Carrión

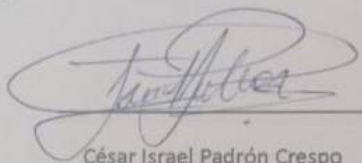
C.I: 0106219892



Cláusula de Propiedad Intelectual

César Israel Padrón Crespo, autor/a del trabajo de titulación "Análisis de comparación de datos de contaminantes atmosféricos: CO, SO₂, NO₂, O₃, CH₂O entre Sentinel 5P y productos satelitales de OMI, MERRA-2 y AIRS en Ecuador", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 18 de marzo de 2022



César Israel Padrón Crespo

C.I: 0105687248



Cláusula de Propiedad Intelectual

Carlos Xavier Cabrera Carrión, autor/a del trabajo de titulación "Análisis de comparación de datos de contaminantes atmosféricos: CO, SO₂, NO₂, O₃, CH₂O entre Sentinel 5P y productos satelitales de OMI, MERRA-2 y AIRS en Ecuador", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 18 de marzo de 2022.

Carlos Xavier Cabrera Carrión

C.I: 0106219892



AGRADECIMIENTOS

A Dios, quién me ha dado fortaleza y me ha guiado siempre en todo mi camino universitario. A mis padres, César y Zaida, por todo el apoyo, el amor y la paciencia que me han brindado durante toda mi vida y que me ha permitido llegar hasta este punto. A mis hermanos, Juan José y Verónica quienes me han acompañado y apoyado siempre.

Israel Padrón

En primer lugar quiero agradecer a Dios por darme la fuerza, sabiduría y salud para poder completar mis estudios universitarios y realizar este estudio de la mejor manera. Al Blgo. Danilo Mejía que con sus conocimientos y apoyo fue un respaldo importante durante el desarrollo de la investigación. De igual manera a la Universidad de Cuenca y a sus docentes que me brindaron las herramientas y transmitieron su conocimiento a lo largo de mi carrera universitaria.

Xavier Cabrera

Agradecemos al Blgo. Danilo Mejía, quien con su colaboración fue un respaldo importante para el desarrollo de la investigación, y al Ing. Aleksandr Khachartyan, quien nos ayudó a la realización de la investigación.

Autores



DEDICATORIA

Dedico este trabajo de titulación primero que nada a Dios por darme la fe y esperanza de seguir luchando por este objetivo. A mis padres César y Zaida quienes con su amor incondicional me guiaron y apoyaron durante todos mis estudios. A mis hermanos por haberme dado el ejemplo de ser una persona estudiosa y responsable. Y a todos los demás integrantes de mi familia por haber sido parte de este sueño anhelado.

Israel Padrón

Dedico este trabajo a Dios por darme la oportunidad de vivir, a mis padres Nube y Oswaldo por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida, por brindarme todas las herramientas necesarias para lograr alcanzar mis metas, también a mis abuelos maternos por confiar siempre en mí, ya que con sus consejos y cariño, me motivaron a seguir adelante y nunca rendirme. Finalmente quiero dedicar este logro a todos mis amigos que me apoyaron y estuvieron siempre en los momentos difíciles, ya que fueron un pilar importante durante todo mi carrera.

Xavier Cabrera



1. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica es uno de los principales problemas ambientales de las últimas décadas debido al aumento de los distintos gases provenientes mayoritariamente de la industrialización y la quema de combustibles fósiles. Esta es una de las principales causas del cambio climático, provocando alteraciones permanentes en el ecosistema terrestre, el aumento de la temperatura, cambios en los ciclos meteorológicos y en la química de los océanos, etc. (Miranzo & del Río, 2015).

Además, se conoce bien que la exposición de las personas a contaminantes atmosféricos afecta en su mayoría al sistema respiratorio y circulatorio, sobre todo contaminantes provenientes de las reacciones con hidrocarburos como el dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), material particulado (MP) y plomo (Pb) (Ballester, 2005). En los últimos años, estos efectos se han convertido en una inquietud que va más allá del carácter científico, causando también una gran preocupación social e incluso política (López & Sergio, 2008).

Las investigaciones sobre la variabilidad y la concentración de los contaminantes en la atmósfera son importantes para predecir su comportamiento y futuras acciones a tomar ante los resultados de los estudios. Existen diferentes formas para realizar mediciones de concentraciones de contaminantes atmosféricos como las técnicas de monitoreo en estaciones utilizando métodos químicos de contacto como: balances de masa y energía, y reacciones químicas específicas. Sin embargo, al utilizar estas técnicas se presentan errores causados al momento de extraer y manipular el contaminante; dando como resultado una cuantificación dificultosa y por otro lado los muestreos generalmente toman largos periodos de tiempo (Rojas Valencia & Nájera, 2011). Otra técnica son las mediciones de percepción remota o imágenes satelitales que monitorean la superficie desde puntos estratégicos y abarcan un extenso camino óptico (Orantes & García, 2010).

Las imágenes satelitales se han utilizado para analizar zonas contaminadas en lugares que carecen de información fehaciente acerca de la extensión de las áreas afectadas. Los datos obtenidos con los sistemas de información geográfica son herramientas útiles para el estudio, manejo y la modelación de un área contaminada (Bremer Bremer et al., 2016). A pesar de



Los avances tecnológicos en la teledetección y la facilidad con la que se obtienen los datos, se necesita tener seguridad de la validez de ellos. Al realizar comparaciones y correlaciones con otros productos satelitales o estaciones de tierra se obtiene un mayor nivel de confianza en las mediciones que los sensores remotos proporcionan, y así se los puede usar para estudios de campo efectivos.

De esta manera al comparar los datos que obtiene el satélite Sentinel 5P (sensor TROPOMI) con los sensores precursores de detección de contaminantes ambientales y además con estaciones de tierra, se podrá verificar la credibilidad de la información que este nuevo satélite nos presenta.

Los datos de los productos satelitales pueden ser usados a pequeña y gran escala, reduciendo costos en el monitoreo atmosférico en lugares que no poseen estaciones en tierra; especialmente el Ecuador, que no cuenta con una red de monitoreo de contaminantes atmosféricos establecida a lo largo de todo el país.

Por consiguiente, el uso de los sensores remotos para la obtención de imágenes satelitales que midan contaminantes atmosféricos puede llegar a presentar ventajas al momento de buscar un método de control de la calidad del aire de bajo costo, permitiendo evaluar grandes extensiones de terrenos o zonas remotas e inaccesibles (De León Mata et al., 2014).



2. ESTADO DEL ARTE

La validación de mediciones de contaminantes atmosféricos proporcionadas por sensores remotos es un proceso importante cuando se utilizan estas nuevas tecnologías, ya que se necesita conocer la confiabilidad y veracidad de sus datos. Existen diversos estudios realizados sobre diferentes productos satelitales como son Sentinel 5P (sensor TROPOMI), OMI, AIRS, MERRA-2, etc.; donde se realizan validaciones de sus mediciones contrastándolas con estaciones de tierra. Además otros estudios comparan las mediciones de ciertos sensores con otros; Sentinel 5P al ser un producto nuevo es necesario validar sus mediciones antes de usarlas.

En China un estudio llevado a cabo por Wang et al (2020) presenta comparaciones de los datos de NO_2 medidos por TROPOMI y su predecesor Ozone Monitoring Instrument (OMI). Para el análisis de las concentraciones diarias de TROPOMI, se hace un resample del tamaño del píxel a una resolución de $0,25 \times 0,25^\circ$ basada en el método de interpolación Inverse Distance Weighted (IDW), idéntico al de OMI. Llegando a la conclusión de que a escala nacional, la columna troposférica de NO_2 derivada de TROPOMI produce patrones espaciales consistentes de NO_2 con OMI, con coeficiente de correlación por encima de 0,93.

En Estados Unidos, Kleipool et al. (2018) realizó un estudio determinando el enfoque y calibración de Sentinel 5P (sensor TROPOMI) con respecto a su producto predecesor OMI (Ozone Monitoring Instrument). En este artículo determina que al medir las concentraciones de CH_2O se producen errores en las densidades de la columna inclinada ajustadas (SCDE), estos errores afectan directamente la relación señal-ruido en sensores remotos. Comparando la calibración de ambos sensores analizados, se concluye Sentinel 5P omite de una mejor manera estos errores SCDE que su predecesor OMI.

En los Países Bajos Veefkind et al. (2012) realizaron un estudio sobre la misión, el instrumento y los productos de datos de Sentinel 5P (sensor TROPOMI), describiendo su resolución espacial y la relación señal-ruido. Además de compararlo con OMI, su misión predecesora; donde concluye que Sentinel 5P posee un umbral de detección más bajo que OMI y por lo tanto resuelve mejor las fuentes los contaminantes medidos por el sensor.



En la ciudad de Bogotá (Colombia) en 2019, se realizó un estudio sobre la comparación entre los productos (CO , O_3 , NO_2 y SO_2) de Sentinel 5P y las estaciones terrestres de calidad del aire de la ciudad. Todo esto en un periodo comprendido entre agosto del 2018 y agosto del 2019; terminado el estudio se reportaron los coeficientes de correlación para CO de 0,55, NO_2 de 0,44, O_3 de 0,05 y el SO_2 de 0,25; demostrando una gran variabilidad con relación a los datos tomados en tierra (Forero, 2019).

En la ciudad de Quito un estudio realizado por Arboleda Guerrero & Vásquez Taco (2021) de la Universidad Politécnica Salesiana realizó una comparativa entre las mediciones obtenidas por Sentinel 5P (sensor TROPOMI) y de La Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ), entre agosto de 2018 y diciembre de 2020. En este estudio se compararon los datos de CO , NO_2 y O_3 . Se obtuvo una correlación positiva tanto estadísticamente como en los mapas espaciotemporales, llegando a la conclusión que la incorporación de nuevos métodos de monitoreo de la calidad del aire es posible con la ayuda de la teledetección



3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Analizar por medio de parámetros estadísticos la calidad de los datos obtenidos entre el satélite Sentinel 5P (Sensor TROPOMI) en lo que respecta a los contaminantes (CO, SO₂, NO₂, O₃, CH₂O) frente a las concentraciones proporcionadas por los sensores MERRA-2, OMI y AIRS en la República del Ecuador desde enero del 2019 hasta diciembre del 2020.

3.2 Objetivos específicos

- Describir cuantitativamente la metodología realizada para la validación de los datos.
- Determinar la correlación entre Sentinel 5P (Sensor TROPOMI) y los demás productos satelitales para cada contaminante (CO, SO₂, NO₂, O₃, CH₂O).
- Analizar la variabilidad de las concentraciones (CO, SO₂, NO₂, O₃, CH₂O) con relación al tiempo para cada satélite.



4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1 Teledetección

La teledetección se define como la observación a distancia de objetos sin estar en contacto directo con ellos. Mediante esta técnica se adquieren imágenes de la superficie terrestre por medio de sensores aéreos o espaciales gracias a la interacción energética que existe entre el suelo y el sensor. Los sistemas de teledetección espacial incluyen los siguientes elementos: fuente de energía, cubierta terrestre, sistema sensor, sistema de recepción-comercialización, intérprete y un usuario final. Hasta los años sesenta, la superficie terrestre era estudiada regionalmente mediante fotografías aéreas. Durante las últimas décadas se produce un importante avance de la teledetección con el desarrollo de sensores como los sistemas de barrido multiespectral y los sistemas activos de microondas, que permiten registrar información en otras regiones del espectro electromagnético, y en formato digital (Chuvieco, 2008).

4.2 Sensores remotos

Los sensores remotos son Instrumentos capaces de captar relaciones espectrales y espaciales de objetos, usados para la obtención de datos a partir de la energía electromagnética (Pérez, 2007).

Bella et al. (2008) describe dos tipos de sensores: los sensores pasivos que captan la energía electromagnética proveniente del sol que es reflejada, así como la emitida por la superficie terrestre en distintas longitudes de onda; y los sensores activos que no dependen de la energía electromagnética del sol ni de las propiedades térmicas de la Tierra, sino que generan su propia energía electromagnética que es transmitida del sensor hacia el terreno independientemente de las condiciones atmosféricas, interactúa con el terreno produciendo retro dispersión-energía reirradiada hacia el sensor y se registra por el receptor del sensor.



4.2.1 Tipos de sensores remotos

- Sensores terrestres: Para este tipo de sensores se puede tener como plataforma a un trípode, una torre de observación, entre otros, en los cuales se instala el sensor. Se obtienen datos precisos, con un costo alto y con un campo de visión limitado.
- Sensores aéreos: Las plataformas utilizadas para estos sensores son los transportes aéreos como los aviones. Estos sensores poseen una alta resolución espacial, pero cuentan con una resolución temporal muy variable, con un alto costo por hectárea.
- Sensor espacial: Las plataformas que se utilizan en estos sistemas son naves espaciales, estaciones orbitales o satélites autónomos que giran alrededor de la Tierra. Tienen la ventaja del bajo costo por hectárea en el proceso de revelado de sus datos (Instituto Politécnico Nacional, 2019).

4.2.2 Características

Las características de los sensores remotos se pueden separar entre las características dinámicas y las características estáticas, así como lo sostiene Díaz (2004):

Estáticas:

- **Campo de medida:** conjunto de valores que pueden ser tomados por la señal de entrada y están comprendidos entre el valor mínimo y máximo que es detectado por el sensor con un error aceptable.
- **Resolución:** Es la capacidad para distinguir entre valores muy próximos de la variable de entrada.
- **Precisión:** Define la variación máxima entre la salida real obtenida y la salida teórica dada como patrón para el sensor.
- **Repetibilidad:** Indica la máxima variación entre valores de salida obtenidos al medir varias veces la misma entrada con el mismo sensor y en idénticas condiciones ambientales.
- **Linealidad:** Cercanía de la curva característica a una recta especificada.
- **Sensibilidad:** Indica la mayor o menor variación de la señal de salida por unidad de la magnitud de entrada.



- **Ruido:** Es cualquier perturbación aleatoria del propio sistema de medida que afecta la señal que se quiere medir.

Dinámicas:

- **Velocidad de respuesta:** Mide la capacidad del sensor para que la señal de salida siga sin retraso las variaciones de la señal de entrada.
- **Respuesta en frecuencia:** Mide la capacidad del sensor para seguir las variaciones de la señal de entrada a medida que aumenta la frecuencia.
- **Estabilidad:** Indica la desviación en la salida del sensor con respecto al valor teórico dado, al variar parámetros exteriores distintos al que se quiere medir como pueden ser las condiciones ambientales.

4.2.3 Tipos de Resolución

- **Resolución Radiométrica:** es la habilidad de un sensor para registrar los más mínimos cambios de energía.
- **Resolución espacial:** hace referencia a lo más pequeño que se puede distinguir en la imagen producida por el sensor para ser capaz discernir lo que está pasando en el área de estudio.
- **Resolución espectral:** se refiere a la capacidad de distinguir y diferenciar entre radiación electromagnética de distintas longitudes de onda, según la necesidad del estudio.
- **Resolución temporal:** se refiere a que tan seguido se adquiere la información por parte del sistema de percepción remota. En la mayoría de los satélites, la frecuencia de cobertura para cualquier sitio en particular es la duración en tiempo que le toma dar la vuelta a la Tierra. Sin embargo, algunos satélites pueden dirigir los sensores para que el sitio de interés se vea varias veces (Jensen, 1996).

4.3 Sentinel 5P (Sensor TROPOMI)

Es la primera misión de Copernicus que se dedica a realizar monitoreos de la atmósfera. Consiste en un satélite equipado con el instrumento Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI), el cual es un sensor multiespectral que registra la reflectancia de longitudes de



onda importantes. Mide concentraciones atmosféricas de ozono, metano, aerosol, monóxido de carbono, formaldehído, óxido de nitrógeno y dióxido de azufre, así como las características de las nubes. Fue lanzado el 13 de octubre del 2017 (ESA, 2021); posee una resolución espacial de 0,01 grados de arco ≈ 1 km y un intervalo de tiempo de 30 minutos (Ialongo et al., 2020). Las unidades con las que se miden son mol/m².

4.4 Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)

Inició como un proyecto intermedio entre el primer modelo MERRA y la próxima generación de análisis del sistema terrestre. Las mediciones de este satélite cubren desde 1980 hasta el presente, con una resolución espacial de $0,5^\circ \times 0,625^\circ \approx 60$ km (GMAO, 2019).

4.5 Ozone Monitoring Instrument (OMI)

Este instrumento es una contribución de la Agencia de Programas Aeroespaciales de los Países Bajos (NIVR) en colaboración con el Instituto Meteorológico de Finlandia (FMI) a la misión Aura. Sus datos cubren desde octubre del 2004. Puede distinguir entre tipos de aerosoles, como humo, polvo y sulfatos. Además proporciona datos de formaldehidos, ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, exposición UV, entre otros. Su resolución espacial puede variar entre $0,1^\circ \approx 10$ km y $0,25^\circ \approx 25$ km (Wang et al., 2019).

4.6 Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)

Es una sonda infrarroja a bordo de la segunda plataforma de órbita polar del Sistema de Observación de la Tierra (EOS). Cada archivo cubre un mes calendario con una resolución espacial de $1 \times 1^\circ \approx 100$ km y sus unidades de medición son DU (Unidades Dobsons) (NASA, 2018).

4.7 Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica se define como la introducción de sustancias provenientes de procesos naturales como antropogénicos en la atmósfera, que interfieran con el bienestar del medio ambiente o la vida humana (Ministerio del Ambiente de Ecuador, 2011). Las



principales fuentes de contaminación son las industrias y el transporte, que involucran procesos de combustión. Esta es la principal causa del cambio climático, provocando alteraciones permanentes en el ecosistema terrestre, aumento de la temperatura, cambios en los ciclos meteorológicos y en la química de los océanos, etc. (Miranzo & del Río, 2015).

4.8 Contaminantes atmosféricos

Los contaminantes que se miden en la atmósfera urbana y afectan su estructura química; provienen principalmente de fuentes antropogénicas como el transporte, industrias, residuos sólidos, etc. Estos se clasifican en contaminantes primarios y secundarios. Los primarios son los que se generan directamente de la fuente de emisión y los secundarios son consecuencia de las reacciones fisicoquímicas que actúan sobre contaminantes primarios (Ballester, 2005).

Entre los que se presentan en mayor cantidad y más comunes se incluyen los óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), ozono (O₃); y, en la atmósfera baja, el plomo (Pb), material particulado, cenizas y el hollín. Los NO_x, los compuestos orgánicos volátiles (VOC), ozono troposférico y los aldehídos se forman a partir de reacciones químicas de contaminantes primarios en presencia de la luz solar. Ciertos gases como el CO₂, CH₄, N₂O, O₃ tiene la capacidad de retener el calor que se debería emitir al espacio debido al fenómeno conocido como “efecto invernadero”, y en los últimos años las actividades antropogénicas han provocado el crecimiento de estos gases, llevando a producir cambios negativos en el clima a escala mundial, regional y local (Forero, 2019).

4.8.1 Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono se clasifica como un contaminante primario, producido por la combustión incompleta de hidrocarburos. Es un gas venenoso, incoloro, inodoro e insípido (Bermejo & Buelvas, 2013).



Se lo considera como uno de los mayores contaminantes de la atmósfera terrestre. Las fuentes principales de producción de este contaminante son los automotores, industrias, incendios forestales y la incineración de materia orgánica (Téllez et al., 2006). El monóxido de carbono, al ingresar al organismo, desplaza el oxígeno de la sangre formando carboxihemoglobina, causando hipoxia en los tejidos y envenenamiento celular. Los diferentes efectos que puede causar en las personas son: mareo, cansancio, somnolencia, pérdida de la memoria, alucinaciones, convulsiones. etc. (Téllez et al., 2006).

Su periodo de vida media en la atmósfera oscila entre un mes y medio y tres meses, dependiendo de los factores meteorológicos del lugar; este tiempo es suficiente para que el contaminante pueda dispersarse por cientos de kilómetros. Además es eliminado de diferentes formas como su conversión a CO_2 , en presencia de un radical hidroxilo (OH) y por eliminación biológica mediante: hongos, bacterias y vegetación (Khalil & Rasmussen, 1990).

4.8.2 Dióxido de nitrógeno (NO_2)

El dióxido de nitrógeno en conjunto con el óxido de nitrógeno forma los llamados óxidos de nitrógeno (Alejo et al., 2011), se derivan principalmente del tráfico vehicular y la quema de combustibles fósiles. Puede modificar otros contaminantes atmosféricos como el ozono y partículas en suspensión, así como contribuir a la formación de la lluvia ácida (Gutiérrez et al., 2018).

Se lo considera como un factor de riesgo para el desarrollo de las enfermedades respiratorias, gradualmente puede causar reducción de la percepción olfativa, irritación nasal, dolores respiratorios y edemas pulmonares (Carnicer, 2008; Consorcio Sanitario de Barcelona, 2010).



El tiempo de residencia de este contaminante en la atmósfera es desde horas hasta tres días, donde sufre procesos de autodepuración debido a fenómenos de transporte, mezcla, transformación química o física y depósito; variando las características y concentración del efluente gaseoso con el tiempo y el espacio. (Alejandrina et al., 2012).

4.8.3 Ozono (O_3)

El ozono se puede encontrar en dos capas atmosféricas. El ozono estratosférico constituye una capa protectora contra los rayos UV, mientras que el ozono troposférico, se considera nocivo para la salud humana y el medio ambiente (Borsese & Esteban, 2005). El ozono troposférico se considera un contaminante secundario, ya que se forma a consecuencia de reacciones químicas de contaminantes primarios como los compuestos orgánicos volátiles (COV) y óxidos de nitrógeno (NO_x) (Querétaro, 2006).

Este contaminante es una molécula inestable y su vida media de varias semanas, esto hace que se pueda transportar grandes distancias según las condiciones meteorológicas (Bermejo et al., 2009). Debido a su escasa capacidad de disolución, el ozono ingresa fácilmente a las vías respiratorias y tejidos pulmonares, causando: falta de aliento, dolor en el pecho, disminución de la función pulmonar y tos; además deteriora la vegetación, reduciendo el crecimiento de bosques y cultivos al interferir en la capacidad de almacenar nutrientes (Delgado, 2005).

4.8.4 Dióxido de azufre (SO_2)

El dióxido de azufre se considera un contaminante primario. Es un gas incoloro, de olor fuerte e irritante; su densidad es mayor que la del aire y tiene una alta solubilidad en el agua. Se produce a partir de la quema de combustibles fósiles, sólidos o líquidos que contienen azufre (Núñez et al., 2019).

Su tiempo de permanencia en la atmósfera depende de los procesos físicos de dispersión y transporte, se estima que permanece en ésta de 2 a 4 días, intervalo durante el cual puede ser



transportado a más de 1000 km del punto de emisión (Garcés, 2004). Durante este tiempo el dióxido de azufre se convierte en ácido al reaccionar con el vapor de agua de la atmósfera; los aerosoles resultantes se precipitan en forma de nieve, niebla o la llamada “lluvia ácida” causando necrosis foliar en la vegetación, deterioro de los suelos y cursos de agua (Sin, 2014).

El dióxido de azufre presenta un riesgo para la salud humana y medioambiental. Afecta directamente al sistema circulatorio y respiratorio, causando: queratitis, inflamación de las vías respiratorias, irritación ocular, alteraciones psíquicas, edemas pulmonares, paros cardíacos y colapsos circulatorios, entre otros (Alvarado, 2006).

4.8.5 Formaldehído (CH₂O)

El formaldehído o metanal es un compuesto reactivo, incoloro, de olor penetrante y muy soluble en agua (Peñalver et al., 2017). Se encuentra en áreas rurales y urbanas y es considerado tóxico para la atmósfera. Causa efectos agudos y crónicos en la salud de las personas como irritación y cáncer. El formaldehído se puede producir por reacciones de compuestos primarios, pero también es emitido por vehículos y ciertos procesos industriales como en la fabricación de abonos, papel, madera contrachapada, antisépticos, medicamentos y cosméticos. (García et al., 2007).

Su alta reactividad junto con la variedad de disponibilidad de compuestos presentes en la atmósfera, hacen que su vida media sea de entre 30 minutos y 2 días. Esto provoca que el contaminante no pueda desplazarse grandes distancias sino más bien se mantenga congregado en las cercanías del lugar de emisión (ATSDR, 1999).

4.9 Sistemas de información geográfica

Se los define como sistemas informáticos orientados a la gestión de datos espaciales que constituyen la herramienta informática más adecuada y extendida para la investigación y el trabajo profesional en Ciencias de la Tierra y Ambientales. Se acepta el año 1966 como fecha



de creación del primer Sistema de Información Geográfica (SIG). Durante los últimos quince años, los SIG han experimentado un rápido desarrollo teórico, tecnológico, organizativo y una amplia difusión tanto en la administración como en los mundos académico y profesional (Sarría, 2006).

4.9.1 Aplicaciones de Sistemas de Información Geográfica

Alonso (2006) sostiene que existen múltiples aplicaciones de los Sistemas de Información Geográfica, estas son:

❖ Aplicaciones científicas

- En ciencias medioambientales y relacionadas con el espacio.
- Modelización cartográfica desarrollando modelos que relacionan variables de temperatura, altitud, orientación, etc.
- Modelos dinámicos utilizando las leyes de la termodinámica y la dinámica de fluidos para hacer un mapa.
- Teledetección, utilizando imágenes de satélite que se manejan de forma óptima en un Sistema de Información Geográfica.

❖ Aplicaciones de gestión

- Cartografía automática y catastros.
- Planificación de espacios protegidos, ordenamiento territorial, planificación urbana, etc.
- Estudios de impacto ambiental: seguimiento de las consecuencias de determinadas actuaciones (presas, diques, carreteras).

❖ Aplicaciones Empresariales

- Marketing: propaganda a residentes cerca del local que cumplan determinadas condiciones.
- Estrategias de distribución: optimización de las rutas de transporte de mercancía.



- Localización óptima de una sucursal en función de los clientes potenciales situados alrededor.

4.10 Método de interpolación de datos: Ponderación de Distancia Inversa (IDW) en SIG

La herramienta IDW (Ponderación de Distancia Inversa) utiliza un método de interpolación que estima los valores de las celdas calculando promedios de los valores de los puntos de datos extraídos de la muestra en la vecindad de cada celda de procesamiento. Cuanto más cerca está un punto del centro de la celda que se está estimando, más influencia o peso tendrá en el proceso de cálculo del promedio, y la influencia de un punto en relación con otros disminuye con la distancia desde el punto desconocido que se desea crear. (QGIS 2.14, 2019)

Si bien este método es el más sencillo de implementar es fundamental saber que, como otros métodos de interpolación, también posee algunas limitaciones; estas pueden producir una disminución en la calidad del resultado de interpolación, cuando los puntos de la muestra original poseen una distribución desigual. Además los valores máximos y mínimos pueden presentarse únicamente en los puntos de datos de la muestra dentro de la superficie interpolada, causando “extremos locales en los puntos de datos” (Mitas & Mitasova, 1999).

Según Guamán (2019) este método es exacto y determinístico presentando mejores resultados para estimar las concentraciones de contaminantes atmosféricos al comparar con otros métodos de interpolación.

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Área de estudio

El área de estudio (Figura 1) comprende todo el territorio ecuatoriano exceptuando la región insular debido a que, por su reducida superficie y escasa actividad industrial, las concentraciones de los contaminantes en esta zona no serían relevantes para el estudio. Ecuador se localiza en la región intertropical al noroeste de Sudamérica entre las latitudes 1°30' N y 5° S y las longitudes 75° 20' W y 91° W. Es atravesado por la cordillera de los Andes de Norte a Sur, separando al país en tres regiones con características geográficas y meteorológicas diferentes: costa, sierra y oriente (Peralta et al., 2013). Limita al norte con Colombia, sur y este con Perú y al oeste con el Océano Pacífico; y comprende una superficie de 256370 km² (Hidalgo, 2017).



Figura 1. Área de estudio



5.2 Obtención de datos satelitales

Para la presente investigación se descargaron datos de las concentraciones de los contaminantes analizados (O_3 , SO_2 , NO_2 , CO , CH_2O) del satélite Sentinel 5P (Sensor TROPOMI) desde la plataforma Google Earth Engine (GEE) (Anexo 1) utilizando un script de programación definido.

La información de MERRA-2, OMI y AIRS se adquirió en la interfaz web GIOVANNI (Anexo 2) proporcionada por la NASA y el Centro de Servicios de Información (GES DISC).

El tiempo de estudio se estableció desde enero del 2019 hasta diciembre del 2020. Los datos obtenidos de cada satélite provienen de diferentes modelos o versiones del sensor y proporcionan la información en distintas resoluciones espaciales, temporales y el tipo de unidades de cada concentración. La tabla 1 detalla las características de cada satélite y sus formas de medición.

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

Satélite	Contaminante medido	Sensor/Banda	Resolución espacial	Resolución temporal	Unidades
	CO	CO_column_number_density	1x1 km	30 minutos	$\frac{mol}{m^2}$
	SO ₂	SO2_column_number_density	1x1 km	30 minutos	$\frac{mol}{m^2}$
	O ₃	O3_column_number_density	1x1 km	30 minutos	$\frac{mol}{m^2}$



Sentinel 5P - Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI)	NO ₂	tropospheric_NO2_column_number_density	1x1 km	30 minutos	$\frac{mol}{m^2}$
	CH ₂ O	tropospheric_HCHO_column_number_density	1x1 km	30 minutos	$\frac{mol}{m^2}$
MERRA-2	CO	CO Column Burden (ENSEMBLE) (M2TMNXCHM v5.12.4)	0,625° x 0,625° ≈ 62,5 x 62,5 km	30 días	$\frac{kg}{m^2}$
	SO ₂	MERRA 2 Model SO2 Column Mass Density (ENSEMBLE) (M2TMNXAER v5.12.4)	0,625° x 0,625° ≈ 62,5 x 62,5 km	30 días	$\frac{kg}{m^2}$
	O ₃	Total column ozone (M2TMNXSLV v5.12.4)	0,625° x 0,625° ≈ 62,5 x 62,5 km	30 días	DU=Unidades Dobsons $(\frac{2.69 \times 10^{20} \text{ moléculas}}{m^2})$
OMI	NO ₂	NO2 Tropospheric Column (30% Cloud Screened)	0,25° x 0,25° ≈ 25 x 25 km	1 día	$\frac{1}{cm^2}$
	CH ₂ O	HCHO column amount (OMHCHOd v003)	0.1°x 0.1° ≈ 10 x 10 km	1 día	$(\frac{2.69 \times 10^{20} \text{ moléculas}}{cm^2})$



AIRES	O ₃	Ozone Total Column (Daytime/Ascending, AIRS-only) (AIRS3STM v7.0)	1x1° ≈ 100 x 100 km	30 días	DU=Unidades Dobsons $\left(\frac{2.69 \times 10^{20} \text{ moléculas}}{\text{m}^2}\right)$
-------	----------------	--	------------------------	---------	---

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

La información descargada se proporciona en formato .tif y se analiza en un software especializado en Sistemas de Información Geográfica (SIG), para un procesamiento previo a la utilización final de los datos y la generación de resultados.

5.3 Pre-procesamiento de datos de los productos satelitales

Debido a que los diferentes productos satelitales poseen una resolución espacial distinta se lleva a cabo un pre-procesamiento de datos siguiendo el modelo metodológico propuesto por Zheng et al. (2019). Esta metodología utiliza el software especializado en SIG, realizando un resample del tamaño del píxel obteniendo imágenes espaciales con la misma resolución espacial, por lo tanto, la misma cantidad de datos.

Primero se realizó una conversión de las imágenes tipo raster a vector (puntos), para su posterior interpolación espacial usando el método Inverse Distance Weighted (IDW), seguido del resample del tamaño del píxel a 1 km² para todos los contaminantes analizados. Una vez obtenidos los resultados del resample se convierte el raster nuevamente en puntos, donde el software especializado en SIG asigna un orden específico a los píxeles, siendo esta disposición la misma para todas las imágenes; por lo tanto se respeta la forma en la que se distribuye espacialmente cada dato.

Finalmente se extraen los datos en formato .csv para poder analizarlos. En la Figura 2 se representa un diagrama de flujo del pre-procesamiento de los datos.

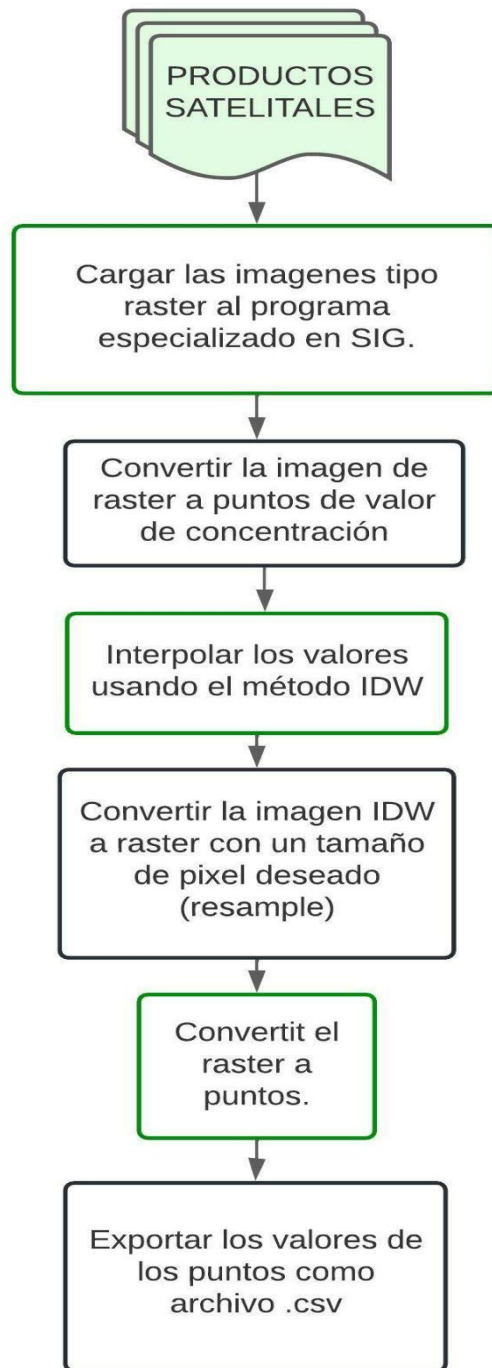


Figura 2. Esquema metodológico del pre procesamiento de las imágenes.

Elaboración: Autores



5.4 Relación de datos satelitales con estaciones de tierra

Antes de correlacionar las mediciones de Sentinel 5P (sensor TROPOMI) con las proporcionadas por MERRA-2, OMI y AIRS, se realizó una comparación entre los datos de dichos satélites y mediciones in situ en tierra. Se utilizaron las concentraciones de la base de datos posterior al resample con la resolución espacial de 1km^2 de cada imagen, donde se obtuvieron los valores de los píxeles que se encontraban superpuestos en la ubicación de las estaciones in situ. Los datos extraídos fueron promedios mensuales de SO_2 , NO_2 , CO y O_3 ; exceptuando los CH_2O , ya que ninguna estación en el país mide este contaminante.

Las estaciones empleadas están ubicadas en Quito y Cuenca, como se observa en la figura 3 y 4, donde también se visualiza el píxel utilizado superpuesto en cada estación. Estas ciudades son las únicas en el país que poseen una red de monitoreo continuo de los contaminantes de interés. Las coordenadas de las estaciones se describen en la tabla 2.

Una vez obtenida la base de datos, se procede a realizar una regresión lineal para encontrar la relación que puede tener cada uno de los productos satelitales con los valores que se consiguen en tierra. Todo esto determinado mediante el coeficiente de determinación R^2 . Esto se hizo con el objetivo de conocer si las mediciones de las estaciones poseen el mismo impacto que las imágenes satelitales a nivel troposférico.

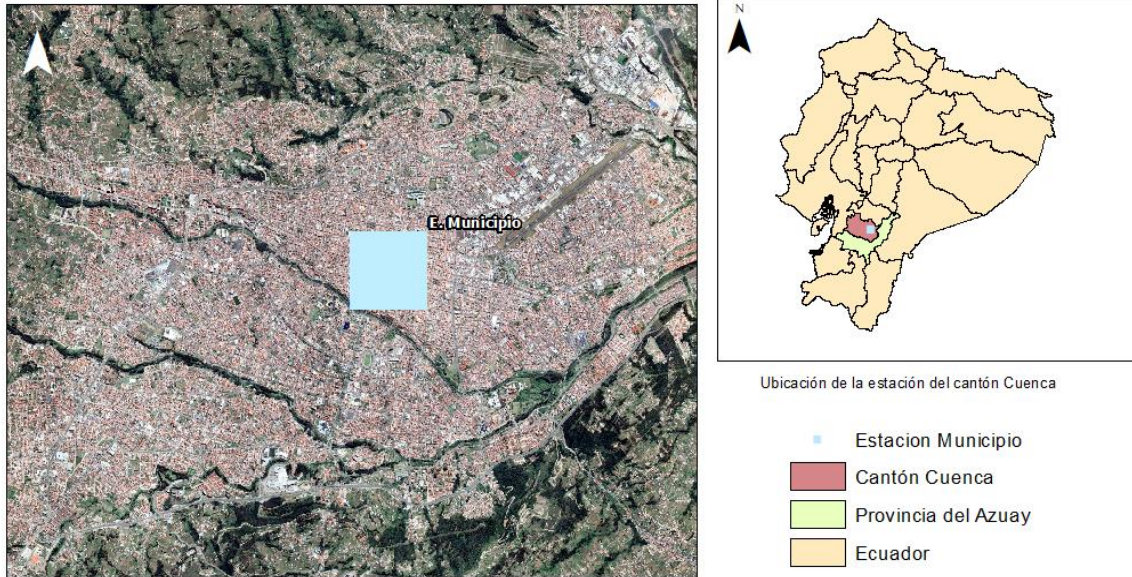


Figura 3. Estaciones ubicadas en la ciudad de Cuenca

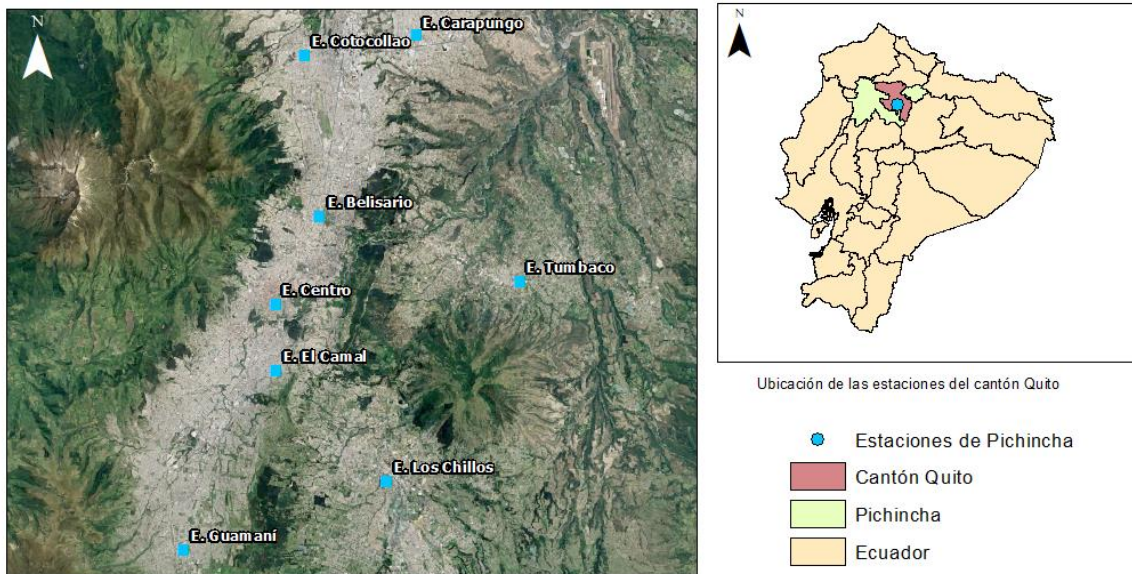


Figura 4. Estaciones ubicadas en la ciudad de Quito

Tabla 2. Coordenadas geográficas de las estaciones de monitoreo de contaminantes atmosféricos.



Cuenca		
Estación	Latitud	Longitud
Estación 01 (Bolívar 7-77 y Borrero)	2°53'49.20" S	79°0'10.8" W
Quito		
Estación	Latitud	Longitud
Belisario	0°10'48" S	78°29'24" W
Carapungo	0°50'54" S	78°26'50" W
Centro	0°13'12" S	78°30'36" W
Cotocollao	0°60'28" S	78°29'50" W
El Camal	0°15'00" S	78°30'36" W
Guamaní	0°19'51" S	78°33'50" W
Los Chillos	0°18'00" S	78°27'36" W
Tumbaco	0°12'36" S	78°24'00" W

Fuente: (EMOV, 2020). (Secretaría del Ambiente MDMQ, 2019)

5.5 Conversión de unidades de la base de datos

Debido a que las unidades de medición de los productos satelitales de MERRA-2, OMI, AIRS no se proporcionan en las mismas de Sentinel 5P (Sensor TROPOMI) se realizaron conversiones de todas las concentraciones a $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ (tabla 3), para su posterior análisis



estadístico. Los resultados se exportan con extensión .txt para poder analizarlos por medio del programa RStudio Version 1.4.1106.

Tabla 3. Conversión de unidades de los diferentes productos satelitales

Satélite	Contaminante medido	Unidades	Conversión
Sentinel 5P	CO, SO ₂ , NO ₂ , O ₃ , CH ₂ O	$\frac{mol}{m^2}$	$\frac{mol}{m^2} \times \frac{1000000 \mu mol}{1 mol} = \frac{\mu mol}{m^2}$
MERRA-2	CO, SO ₂	$\frac{kg}{m^2}$	$\frac{kg}{m^2} \times \frac{1000 g}{1 kg} \times \frac{1 mol}{\text{peso molecular (g)}} \times \frac{1000000 \mu mol}{1 mol} = \frac{\mu mol}{m^2}$
	O ₃	DU=Unidades Dobsons $(\frac{2.69 \times 10^{20} \text{ moléculas}}{m^2})$	$\frac{2.69 \times 10^{20} \text{ moléculas}}{m^2} \times \frac{1 mol}{6,022 \times 10^{23} \text{ moléculas}} \times \frac{1000000 \mu mol}{1 mol} = \frac{\mu mol}{m^2}$
OMI	NO ₂	$\frac{1}{cm^2}$	$\frac{\text{moléculas}}{cm^2} \times \frac{1 mol}{6,022 \times 10^{23} \text{ moléculas}} \times$ $\frac{1000000 \mu mol}{1 mol} \times \frac{10000 cm^2}{1 m^2} = \frac{\mu mol}{m^2}$
	CH ₂ O	$\frac{\text{moléculas}}{cm^2}$	$\frac{\text{moléculas}}{cm^2} \times \frac{1 mol}{6,022 \times 10^{23} \text{ moléculas}} \times$ $\frac{1000000 \mu mol}{1 mol} \times \frac{10000 cm^2}{1 m^2} = \frac{\mu mol}{m^2}$
AIRS	O ₃	DU=Unidades Dobsons $(\frac{2.69 \times 10^{20} \text{ moléculas}}{m^2})$	$\frac{2.69 \times 10^{20} \text{ moléculas}}{m^2} \times \frac{1 mol}{6,022 \times 10^{23} \text{ moléculas}} \times \frac{1000000 \mu mol}{1 mol} = \frac{\mu mol}{m^2}$

Elaboración: Autores

5.6 Análisis de parámetros estadísticos

5.6.1 Diagramas de caja

Utilizando la base de datos de cada producto satelital con su respectivo contaminante tratado, se realizaron diagramas de caja que representan los valores que contiene una variable y su distribución de forma visual mediante sus cuartiles, estos valores dividen la base de datos en cuatro grupos iguales basados en cinco valores clave: mínimo, primer cuartil, mediana, tercer cuartil y máximo. La caja en el gráfico muestra el 50% medio de los valores de los datos, también conocido como rango intercuartílico (IQR). La mediana es representada como la línea que divide la caja por la mitad. Además se ilustran los valores máximos y mínimos mediante bigotes que se extienden desde la caja. Las concentraciones atípicas se muestran como puntos que se extienden más allá de los bigotes, y son aquellos valores menores al $Q1 - 1,5 \text{ IQR}$ y los mayores a $Q3 + 1,5 \text{ IQR}$. (Almela, 2019).

Posteriormente se cuantifican los valores atípicos de cada contaminante y se obtiene un porcentaje con respecto al total de datos, con el fin de conocer si estos valores causarían un sesgo o variación en el análisis final.

5.6.2 Análisis de correlación mediante regresión lineal

Mediante RStudio Version 1.4.1106 se realizó una regresión lineal simple para los diferentes contaminantes analizados. De esta manera se obtiene la relación entre los productos satelitales AIRS, MERRA-2 y OMI con el satélite Sentinel 5P (Sensor TROPOMI).

Con la regresión lineal se obtuvo el valor de R^2 o coeficiente de determinación que expresa estadísticamente el porcentaje de ajuste de los datos al modelo de regresión ajustada, es decir, la proximidad que existe entre los valores de los datos analizados. También se puede entender como el porcentaje de varianza explicada por la recta de regresión; su valor estará entre 0 y 1 y siempre es igual al cuadrado del coeficiente de correlación (Vila et al., 2004). La ecuación de regresión lineal se describe a continuación:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon$$

Ecuación 1. Regresión lineal.



Donde β_0 y β_1 son parámetros del modelo de regresión, “x” es la variable independiente, es decir, los datos satelitales de Sentinel 5P (sensor TROPOMI); “y” es la variable dependiente, es decir, los datos de los diferentes productos satelitales; ϵ es la variable aleatoria o error, que explica la variabilidad en “y” que no se puede explicar con la relación lineal entre “x” y “y” (Moreno et al. 2017).

5.6.3 Diferencias de concentraciones

En la base de datos de las imágenes procesadas a un tamaño de píxel de 1 km², se procedió a realizar una diferencia espacial entre los valores de las concentraciones mensuales de cada contaminante. Posteriormente se promediaron estas diferencias obteniendo un mapa para cada contaminante donde se representan el rango de diferencia de medición de los productos satelitales en el área de estudio.

Además con los promedios mensuales de las diferencias de las concentraciones se obtuvo un coeficiente de variación que representa la dispersión relativa del conjunto de datos, y es igual al cociente de la desviación estándar sobre la media (Hernández, 2020).

5.7 Series de tiempo

Mediante la base de datos obtenida en el procesamiento de datos de los productos satelitales, se procede a realizar gráficas de series de tiempo utilizando el software Excel, para AIRS, MERRA-2, OMI y Sentinel 5P con cada uno de los valores de los contaminantes (CO, SO₂, NO₂, O₃, CH₂O) promediando sus concentraciones mensualmente. Se realizó una línea temporal mensual de todo el periodo de estudio; de esta forma se observa la tendencia de las concentraciones, valores atípicos, cambios repentinos, patrones estacionales y una apreciación visual de la relación entre los mismos.

5.8 Mapas de concentración anual

Mediante el método de interpolación IDW se realizaron mapas del promedio anual de las concentraciones de cada satélite en toda el área de estudio para contrastar las semejanzas y diferencias que existen en los niveles de contaminación medidos por cada producto satelital.

5.9 Análisis de correlación con diferente tamaño de pixel

Se realizó un segundo proceso de resample, esta vez, a las imágenes de Sentinel 5P, dónde se disminuye su resolución espacial, siendo esta equivalente a la de los demás productos (AIRS, MERRA-2 y OMI) según cada contaminante. Los diferentes procesos de resample y las dimensiones de los resultados se detallan en la figura 5.

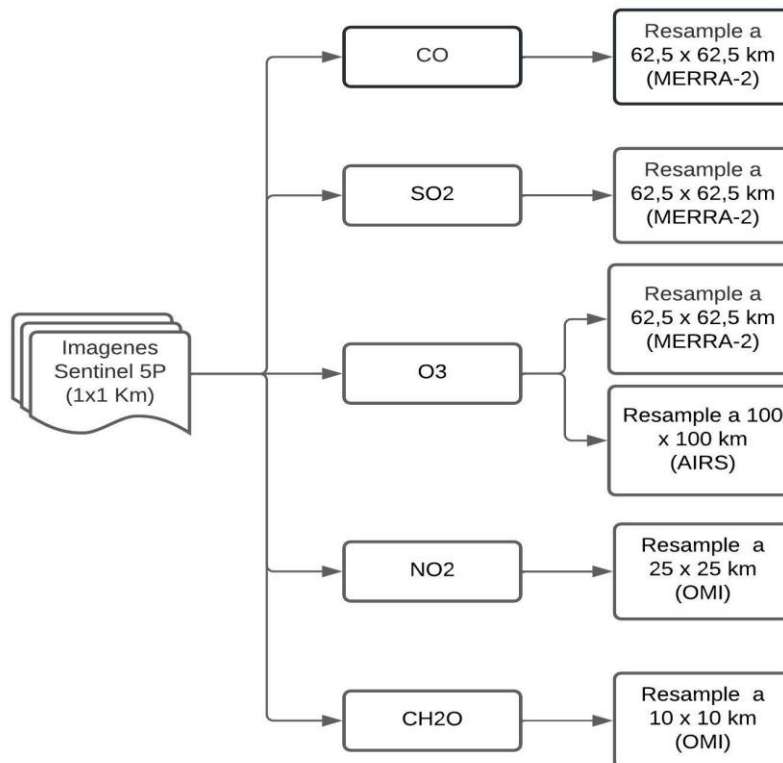


Figura 5. Esquema metodológico del resample de las imágenes de Sentinel 5P.

6. RESULTADOS

6.1 Análisis de correlación de CO, NO₂, O₃ y SO₂ con estaciones de tierra

En la tabla 4 se muestran los coeficientes de determinación de O₃, CO, NO y SO₂ de las correlaciones entre las estaciones de tierra y los productos satelitales.

Los resultados de R² del O₃ son cercanos a 1 por lo que se ajustan al modelo de regresión; se obtuvo 0,9103; 0,9101 y 0,9127 en las correlaciones entre las estaciones de tierra con Sentinel 5P, MERRA-2 y AIRS, respectivamente. Las correlaciones para el CO de igual manera se acercan al valor de 1, lo cual indica un ajuste al modelo, con valores de 0,8973 para Sentinel 5P (Sensor TROPOMI) y 0,9035 para MERRA-2. En los resultados del NO₂ los coeficientes de determinación son más bajos que los contaminantes descritos anteriormente, con un 0,7297 para Sentinel 5P y 0,5363 para OMI, ajustándose al modelo.

Los valores que poseen una correlación baja, ya que su valor se acerca a 0 en el coeficiente R² corresponden al SO₂ con un resultado de 0,3604 y 0,3364 para Sentinel 5P (Sensor TROPOMI) y MERRA-2, respectivamente.

Tabla 4. Correlación de O₃, CO, NO₂ y SO₂ entre las estaciones de tierra y los productos satelitales

Contaminante	Correlación	R ²
O ₃	Estaciones/Sentinel 5P	0,9101
	Estaciones/MERRA-2	0,9103
	Estaciones/AIRS	0,9127
CO	Estaciones/Sentinel 5P	0,8973
	Estaciones/MERRA-2	0,9035
NO ₂	Estaciones/Sentinel 5P	0,7297
	Estaciones/OMI	0,5363
SO ₂	Estaciones/Sentinel 5P	0,3604
	Estaciones/MERRA-2	0,3364

Elaboración: Autores

6.2 Resultados de parámetros estadísticos

6.2.1 Diagramas de caja

A partir del resample de las imágenes a 1km^2 , se obtuvieron 249099 datos por cada mes de cada contaminante. Se unieron las concentraciones de los 24 meses de estudio obteniendo 5978637 datos de cada contaminante y se representó esta base de datos mediante diagramas de caja.

En la figura 6 se visualiza el diagrama de caja de O_3 en el satélite AIRS, MERRA-2 y Sentinel 5P, dónde se puede observar una que no existen valores atípicos en la base de datos de estos contaminantes por lo tanto representa un 0% con respecto a la base de datos total; además la distribución de los valores entre los tres productos satelitales es semejante.

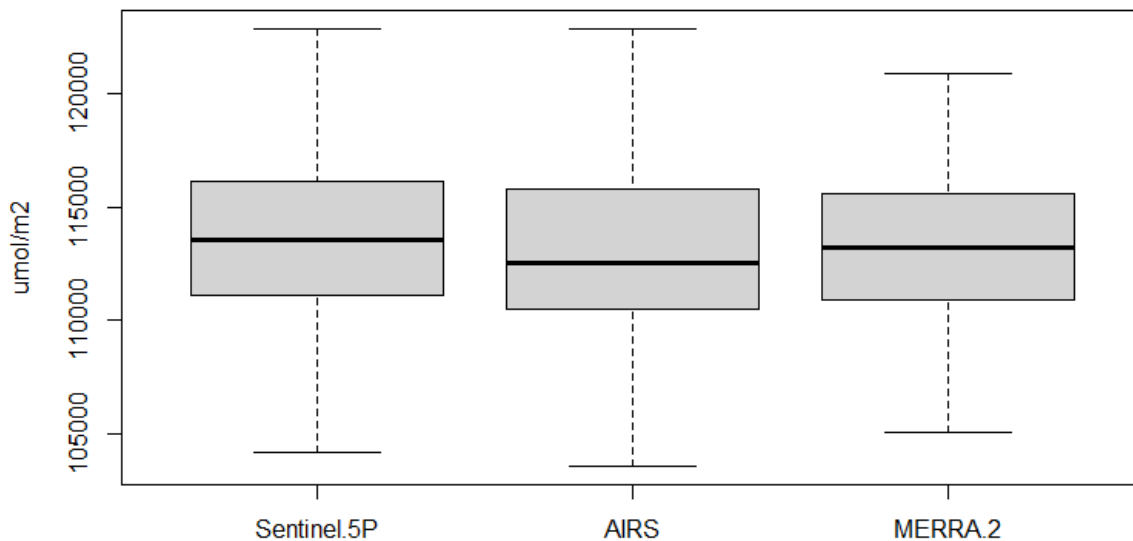


Figura 6. Diagrama de caja de la base de datos de O_3 .

En la figura 7 se observa el diagrama de caja de CO de MERRA-2 y Sentinel 5P, dónde se puede visualizar que los valores de concentración de estos dos satélites discrepan en cuanto al rango de medición, se puede ver que Sentinel 5P posee un rango de medición más alto con respecto a MERRA-2. De igual manera ambos satélites poseen valores atípicos, estos representan un 0,61% en Sentinel 5P y 0,62% en MERRA-2 con respecto a la base de datos total.

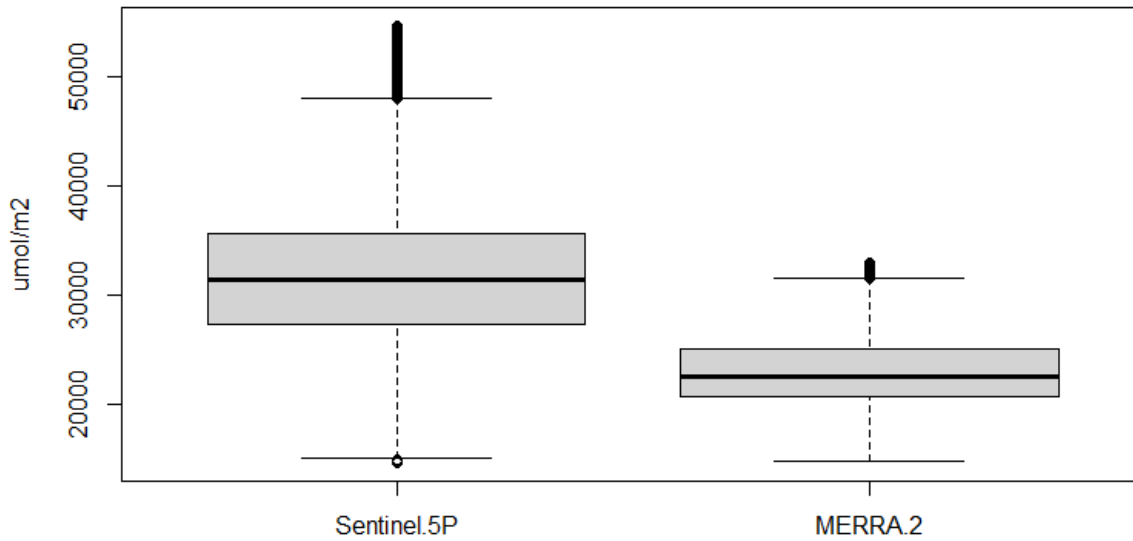


Figura 7. Diagrama de caja de la base de datos de CO.

En las figuras 8 y 9 se muestra la dispersión de los datos de NO_2 de Sentinel 5P y OMI respectivamente, mediante diagramas de caja. Se puede observar que los valores de sus concentraciones son similares en cuanto a su dispersión. Además ambos productos satelitales poseen una gran cantidad de valores atípicos, sin embargo con respecto la cantidad total estos valores representan un 0,42% para Sentinel 5P y 1,11% en OMI, con respecto al total de valores por lo tanto no causarán sesgos en el análisis de los valores.

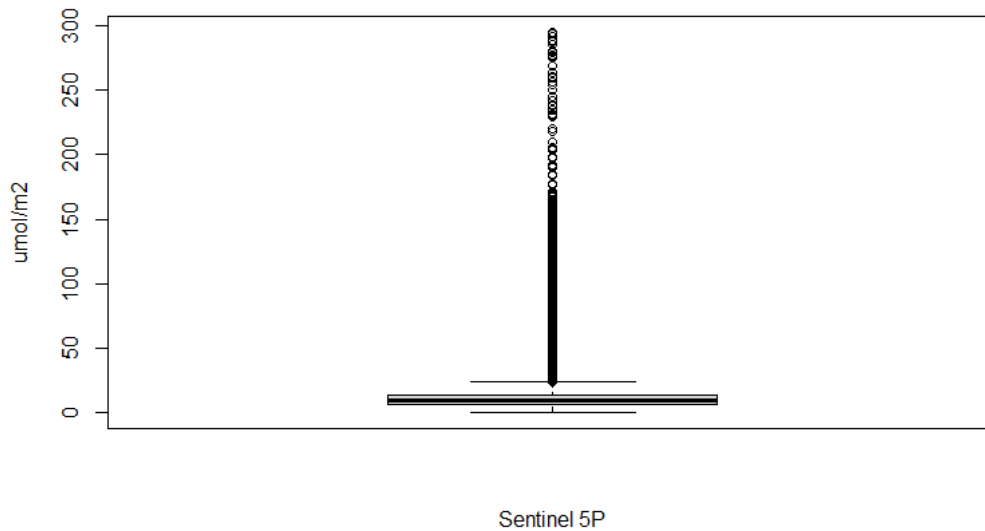


Figura 8. Diagrama de caja de la base de datos de NO_2 del satélite Sentinel 5P.

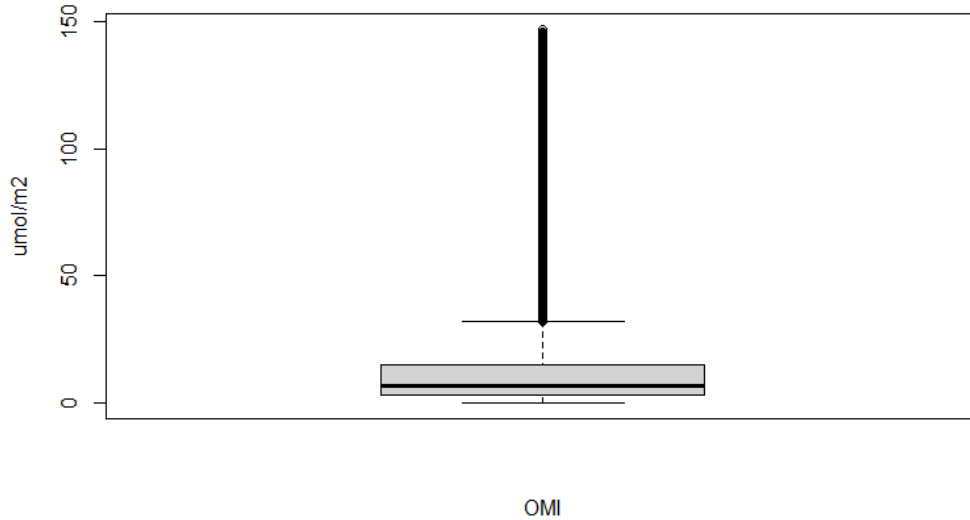


Figura 9. Diagrama de caja de la base de datos NO₂ del satélite OMI.

La figura 10 y 11 muestran los diagramas de caja de SO₂ de MERRA-2 y Sentinel 5P, respectivamente. Estos diagramas se dividen en dos figuras debido a la discrepancia que existe entre las mediciones de los satélites. El diagrama de caja de MERRA-2 muestra una gran cantidad de valores atípicos, estos representan un 0,39 % con respecto a la base de datos total. La figura 10 igualmente muestra una gran cantidad de valores atípicos para Sentinel 5P, esto provoca que exista dificultad en la visualización del diagrama de caja, estos valores atípicos representan un 0,67 % en referencia a la cantidad total de valores de este producto satelital.

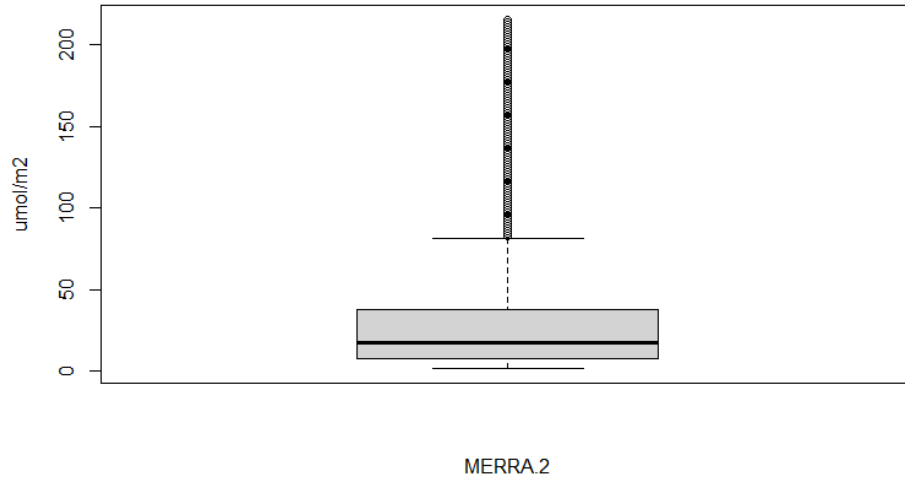


Figura 10. Diagrama de caja de la base de datos de SO_2 del satélite MERRA-2.

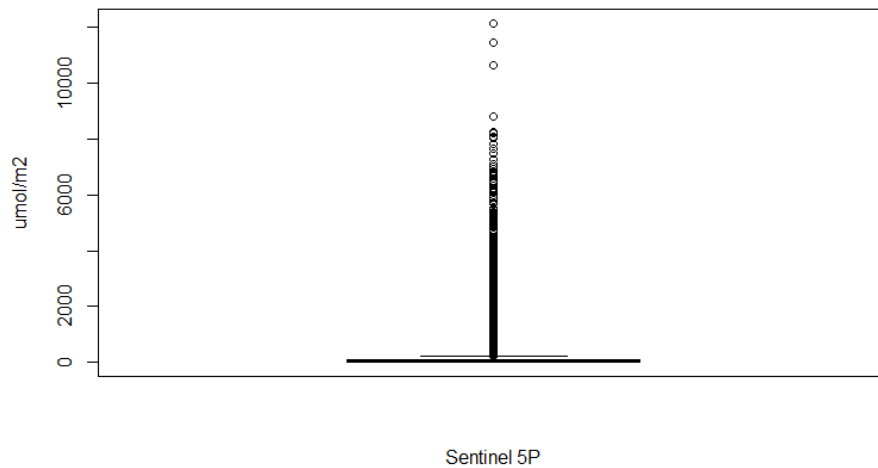
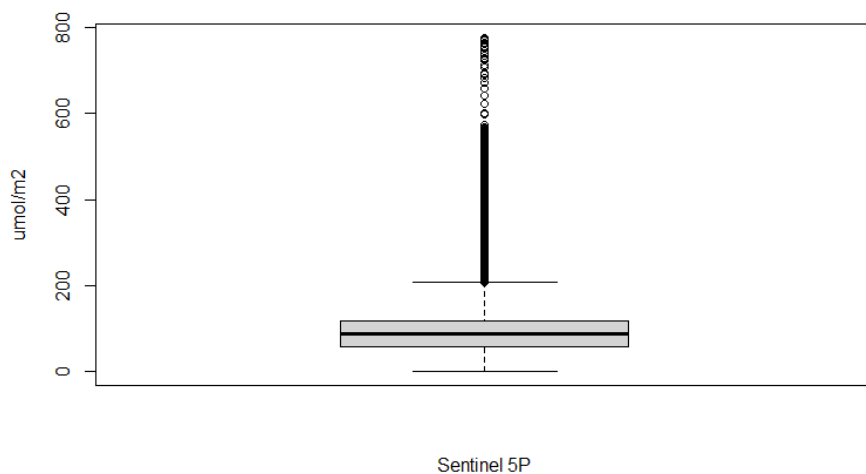
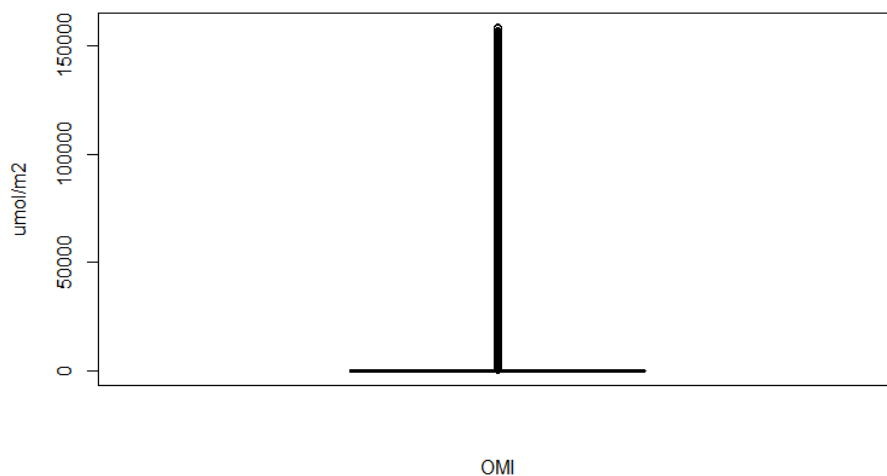


Figura 11. Diagrama de caja de la base de datos de SO_2 del satélite Sentinel 5P.

Los diagramas de caja de CH_2O se representan en la figura 12 para Sentinel 5P y la figura 13 para OMI. En ambas gráficas se puede observar que los valores atípicos se encuentran muy lejanos al resto de concentraciones, lo que dificultan la visualización del diagrama de caja; estos valores representan un 1,12% del total de los valores de Sentinel 5P y 0,85% de los valores de OMI.

Figura 12. Diagrama de caja de la base de datos de CH₂O del satélite Sentinel 5P.Figura 13. Diagrama de caja de la base de datos de CH₂O del satélite OMI.

6.2.2 Análisis de correlación mediante regresión lineal entre Sentinel 5P (Sensor TROPOMI) con OMI, MERRA-2 y AIRS

Los resultados de la correlación entre Sentinel 5P (sensor TROPOMI) y los productos satelitales OMI, MERRA-2 y AIRS en el resample a 1km² se muestran en la tabla 5.

El valor crítico de la prueba estadística, conocido comúnmente como “p-value” en todas las correlaciones de los contaminantes fue $2,2e^{-16}$. Arias & Molina (2017) sugieren que si una muestra de datos muestra un valor p-value menor a 0,05 se posee suficiente evidencia para rechazar una hipótesis nula, es decir, que los datos analizados tienen una muy baja

probabilidad de no ser válidos para la investigación. Por lo tanto, la base de datos utilizada para esta investigación es válida para el estudio.

Tabla 5. Correlación de los valores de Sentinel 5P con OMI, MERRA-2 y AIRS.

Tamaño de pixel (resample)	Satélite	Contaminante	R ²
1 x 1 km	MERRA-2	CO	0,4154
		SO ₂	0,00646
		O ₃	0,8165
	OMI	NO ₂	0,3721
		CH ₂ O	0,0002785
	AIRS	O ₃	0,8223

Elaboración: Autores

Los valores del coeficiente de determinación R² de la correlación para SO₂ y CH₂O fueron de 0,006461 y 0,0002785 respectivamente; valores cercanos a 0, lo cual indica un bajo o nulo ajuste al modelo de correlación (Tabla 6).

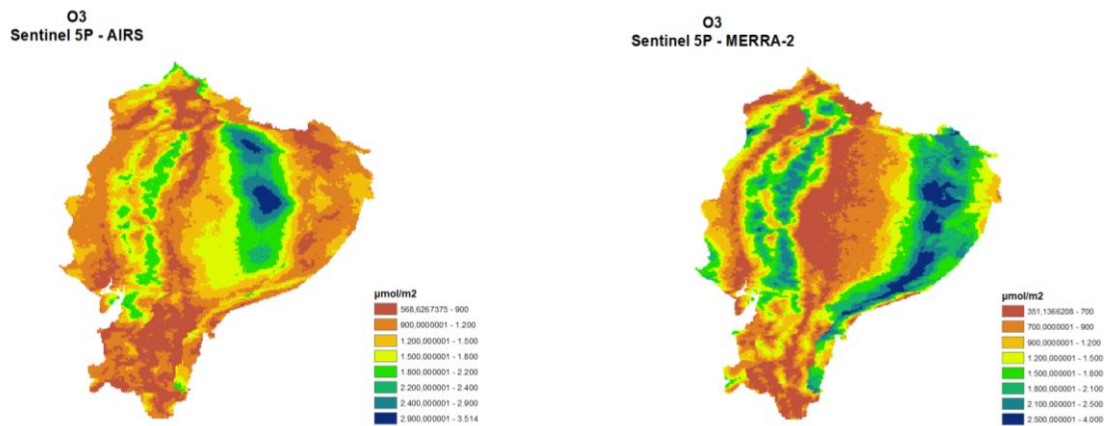
El coeficiente de regresión R² para el NO₂ fue de 0,3721, este valor es más elevado a comparación de los contaminantes antes mencionados, sin embargo, se aleja del ajuste del modelo de regresión.

Para el CO se obtuvo un coeficiente de determinación R² de 0,4154; este valor de igual manera indica un bajo ajuste al modelo de correlación, sin embargo se evidencia un incremento a considerar en comparación al SO₂, NO₂ y CH₂O.

Los coeficientes de determinación más elevados corresponden al O₃, dando como resultados 0,8165 en el satélite MERRA-2 y 0,8223 en AIRS. Estos coeficientes están cercanos a 1 es decir y representa una alta correlación entre las concentraciones medidas por Sentinel 5P y los productos satelitales tomados a comparar.

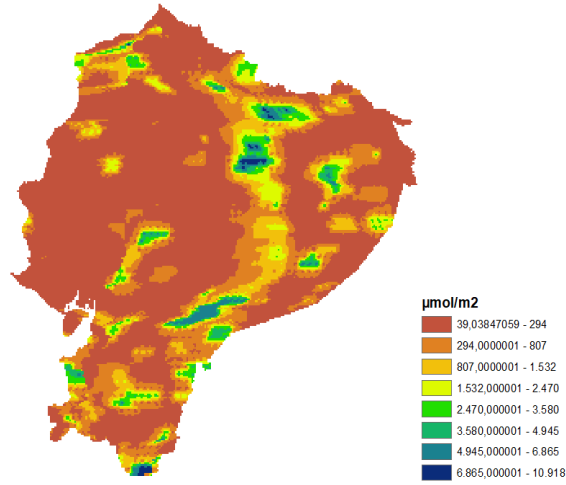
6.2.3 Resultados de diferencias de concentraciones

En el mapa 1, 2, 3, 4 y 5 se observan los rangos de diferencia que existe entre el valor de las concentraciones de Sentinel 5P y los demás productos satelitales (OMI, MERRA-2 y AIRS) donde se visualiza los sectores que existe más discrepancia entre las mediciones de las concentraciones y el rango de esta diferencias.



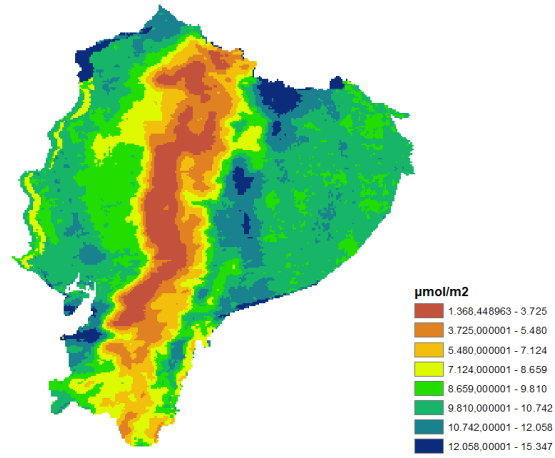
Mapa 1. Diferencia de concentraciones de O₃ entre (Sentinel 5P y AIRS) y (Sentinel 5P y MERRA-2).

CH₂O
Sentinel 5P - OMI



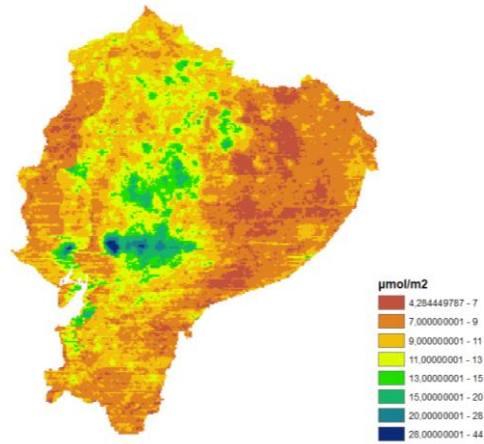
Mapa 2. Diferencia de concentraciones CH₂O, entre Sentinel 5P y OMI.

CO
Sentinel 5P - MERRA-2



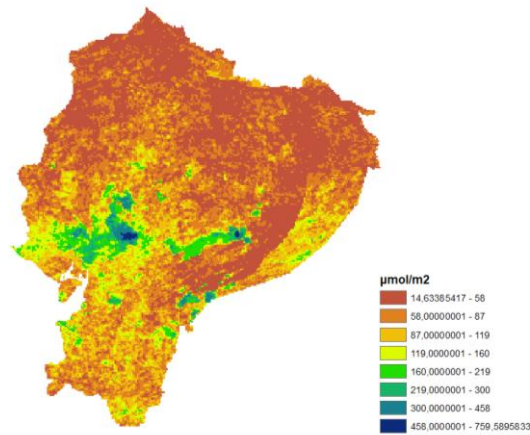
Mapa 3. Diferencia de concentraciones CO, entre Sentinel 5P y MERRA-2.

NO₂
Sentinel 5P - OMI



Mapa 4. Diferencia de concentraciones NO₂, entre Sentinel 5P y OMI.

SO₂
Sentinel 5P - MERRA-2



Mapa 5. Diferencia de concentraciones SO₂, entre Sentinel 5P y Merra-2.

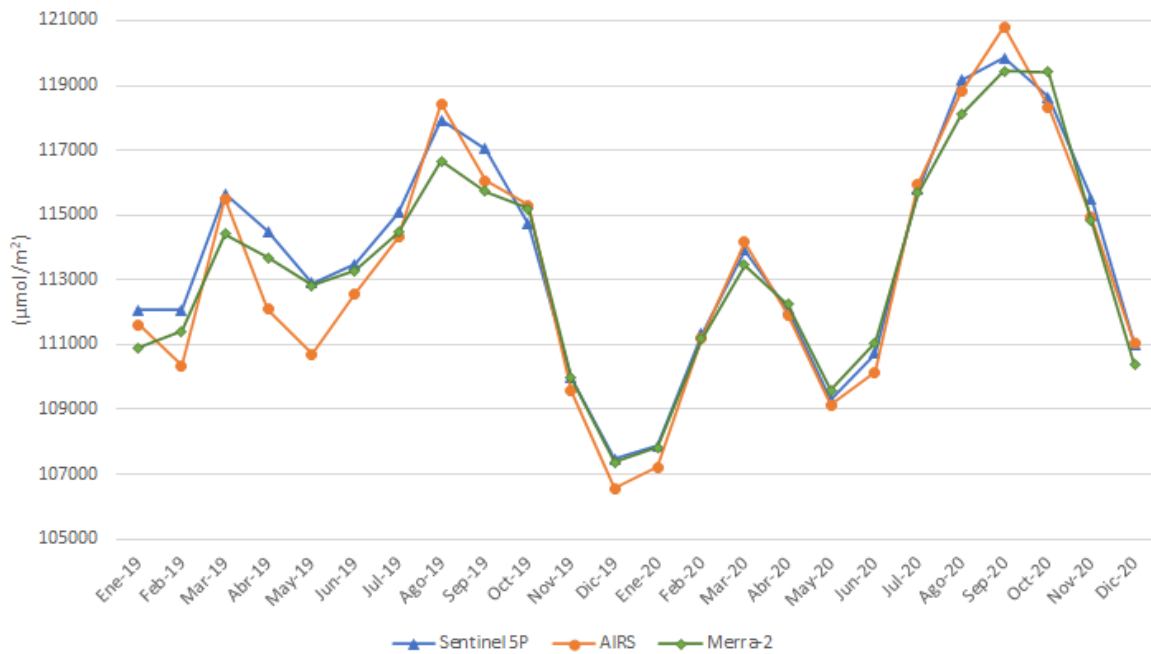
En base a las diferencias espaciales de cada contaminante, se calculó la varianza, desviación estándar y la media para cada uno, con el fin de obtener los coeficientes de variación de cada diferencia, estos valores se detallan en la tabla 6.

Tabla 6. Media, Varianza, Desviación estándar y Coeficientes de variación de las diferencias de concentraciones de los productos satelitales.

	Media	Varianza	Desviación estándar	Coefficiente de variación
O ₃ (Sentinel 5P - AIRS)	1337,84	229072,15	578,61	0,36
O ₃ (Sentinel 5P - MERRA-2)	1268,26	346284,89	588,46	0,46
CO (Sentinel 5P - MERRA-2)	8657,56	6731800,88	2594,57	0,29
NO ₂ (Sentinel 5P - OMI)	9,73	6,89	2,62	0,27
SO ₂ (Sentinel 5P - MERRA-2)	81,35	2554,39	50,54	0,62
CH ₂ O (Sentinel 5P - OMI)	584,37	1038885,63	1019,26	1,74

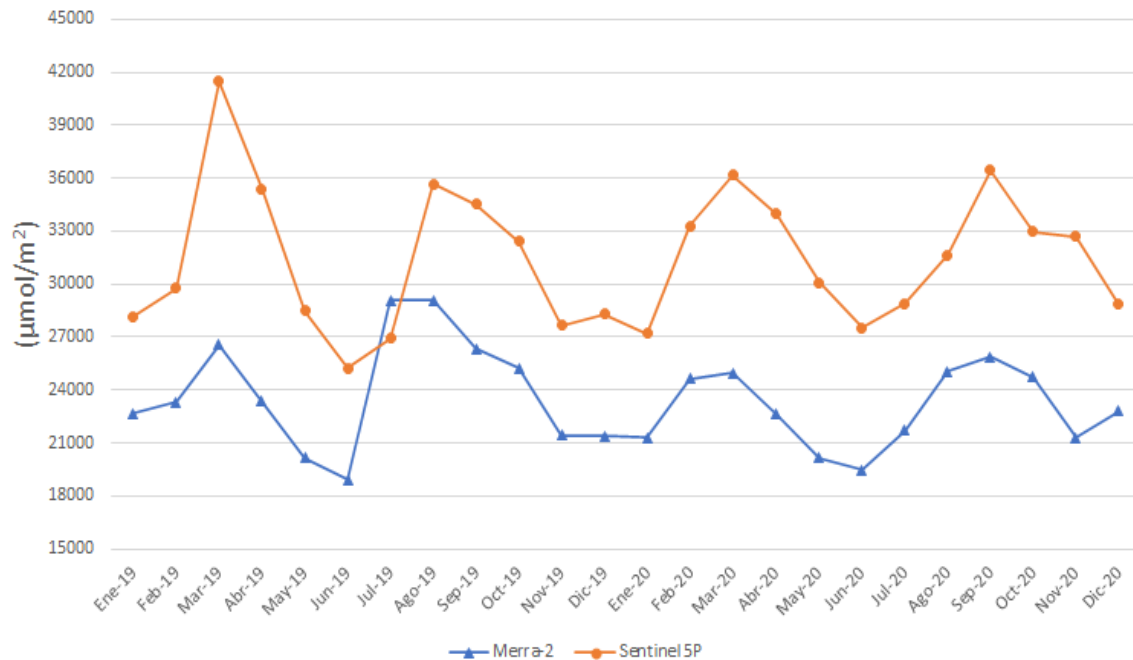
6.3 Series de tiempo

En la gráfica 1, correspondiente al O₃, se puede observar una tendencia similar entre sus valores en el periodo de estudio; con concentraciones mínimas en el mes de diciembre del 2019 y máximas en septiembre del 2020 entre los productos satelitales: Sentinel 5P (Sensor TROPOMI), AIRS y MERRA-2.



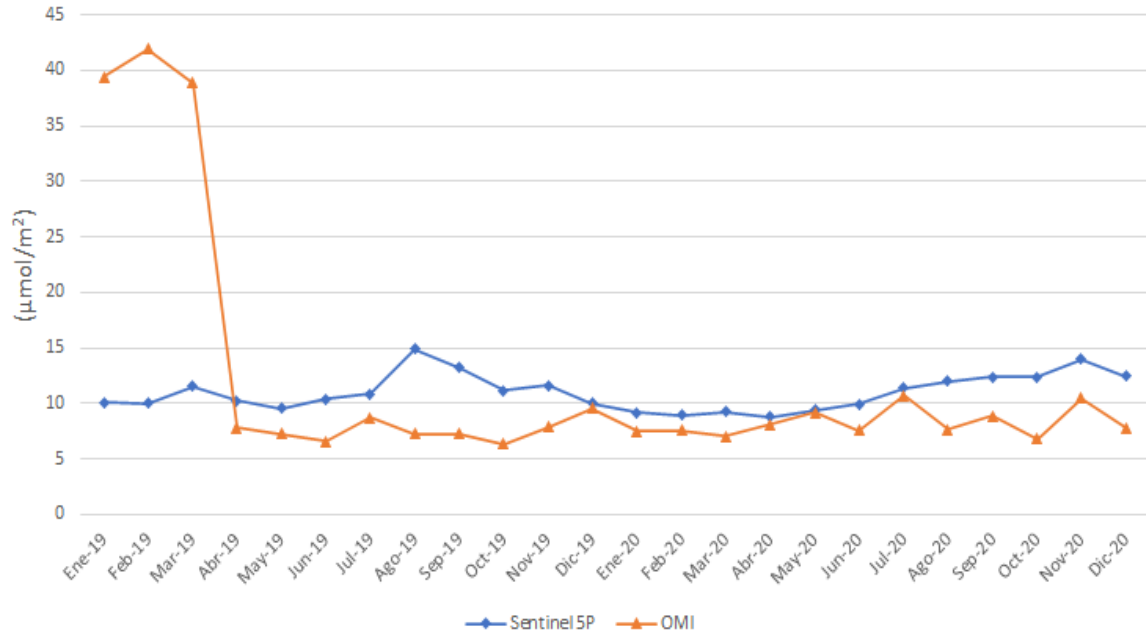
Gráfica 1. Comparación de series de tiempo de O₃ entre Sentinel 5P, MERRA-2 y AIRS.

Con respecto al CO, la gráfica 2 muestra una tendencia similar en la variabilidad de las concentraciones, sin embargo, los valores obtenidos con el producto satelital MERRA-2 son inferiores, en comparación a Sentinel 5P (Sensor TROPOMI).



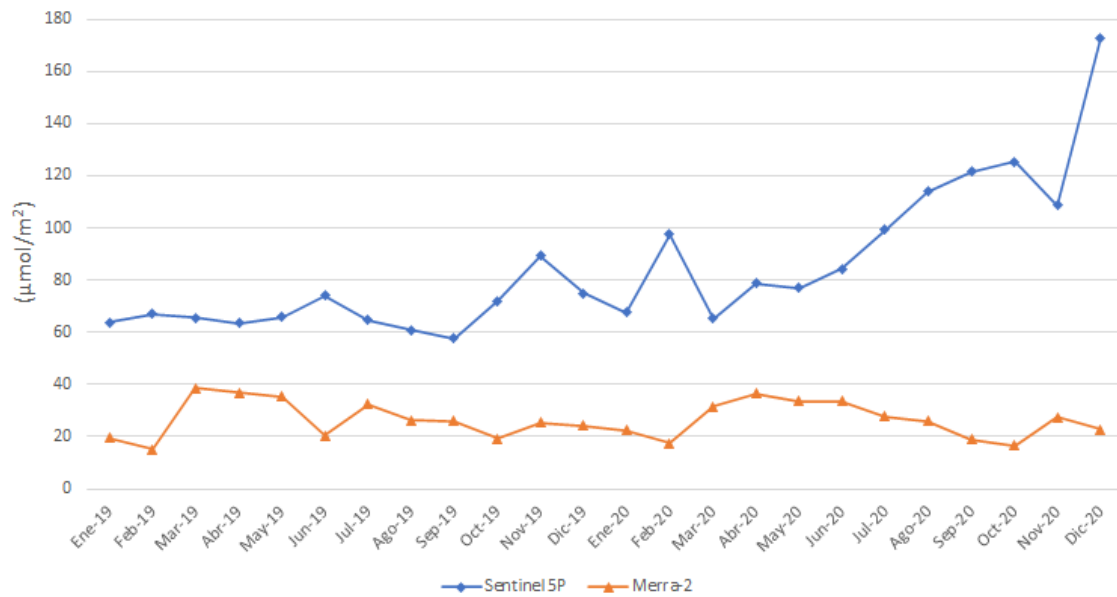
Gráfica 2. Comparación de las series de tiempo de CO entre Sentinel 5P y MERRA-2.

La gráfica 3 muestra la serie de tiempo del NO₂ con respecto a Sentinel 5P (sensor TROPOMI). Se evidencia una baja variabilidad entre los valores de Sentinel 5P valores (9-15 μg/m²). Las concentraciones de OMI, poseen una variabilidad similar (5-10 μg/m²), a excepción de los meses de enero, febrero y marzo del 2019 que presentan valores alrededor de 40 μg/m².



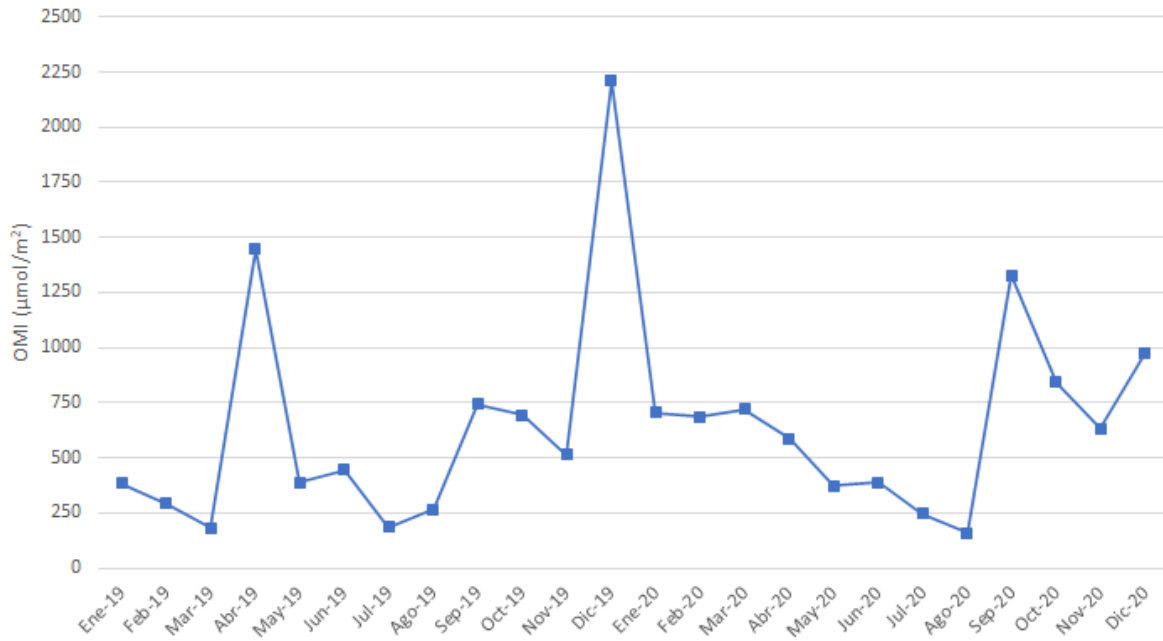
Gráfica 3. Comparación de serie de tiempo de NO₂ entre Sentinel 5P y OMI.

En la gráfica 4, las concentraciones de SO₂ presentan mínimos cercanos a 60 μmol/m² y un máximo cercano a 180 μmol/m² en Sentinel 5P (Sensor TROPOMI). Por otro lado en los valores de MERRA-2 se observan mínimos cercanos a 15 μmol/m² y máximos a 40 μmol/m², evidenciándose una tendencia sin ninguna relación entre los mismos.



Gráfica 4. Comparación de serie de tiempo de SO₂ entre Sentinel 5P y MERRA-2.

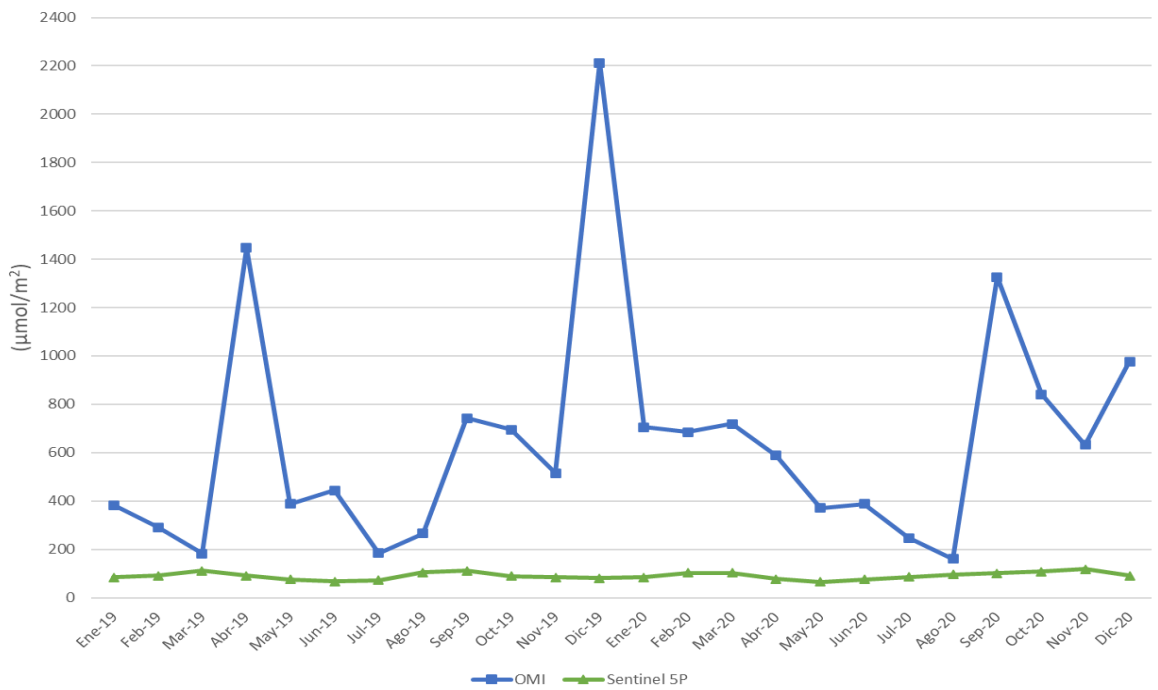
Las series de tiempo de CH_2O se dividen en dos diferentes gráficas debido a la disparidad en sus concentraciones. Los valores de OMI se encuentran en la gráfica 5, aquí se presenta una gran variabilidad entre las mediciones de este producto satelital, con máximo de alrededor de $2200 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ y mínimos de $160 \mu\text{mol}/\text{m}^2$. Por el contrario las concentraciones de Sentinel 5P (Sensor TROPOMI) (gráfica 6) poseen un rango que va desde los 65 hasta los $120 \mu\text{mol}/\text{m}^2$. Estas gráficas muestran que los niveles de concentración y tendencias entre ambos productos satelitales no poseen ninguna similitud entre ellos. Además en la gráfica 7 se representan estas dos series de tiempo juntas corroborando que sus concentraciones son dispares.



Gráfica 5. Serie de tiempo de CH_2O de OMI.



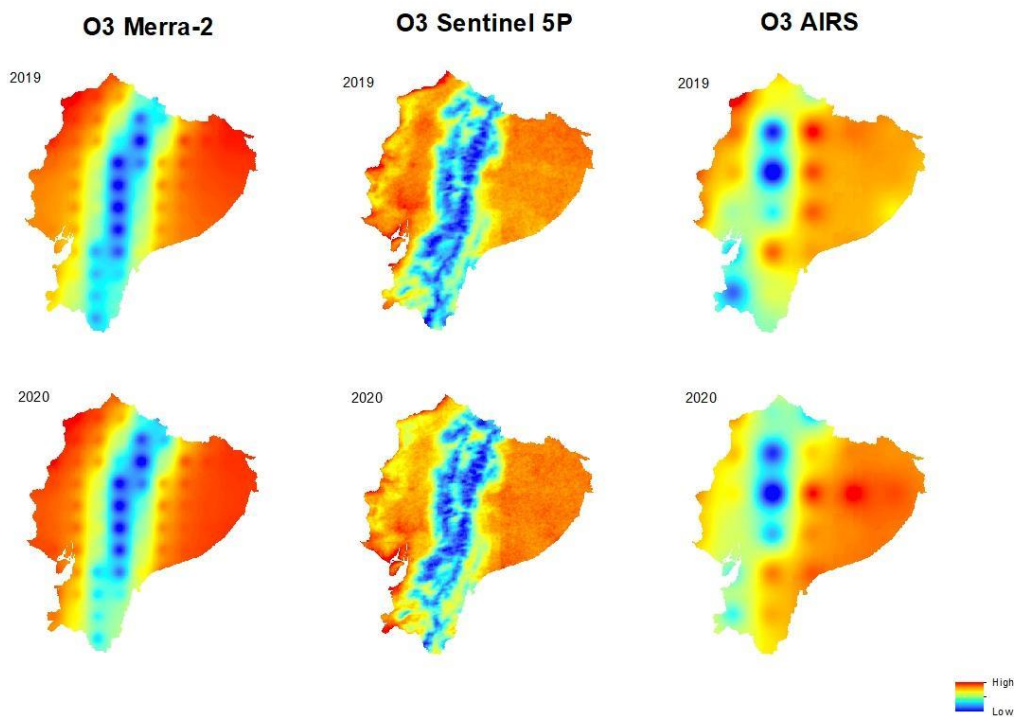
Gráfica 6. Serie de tiempo de CH₂O de Sentinel 5P.



Gráfica 7. Serie de tiempo de CH₂O de Sentinel 5P y OMI.

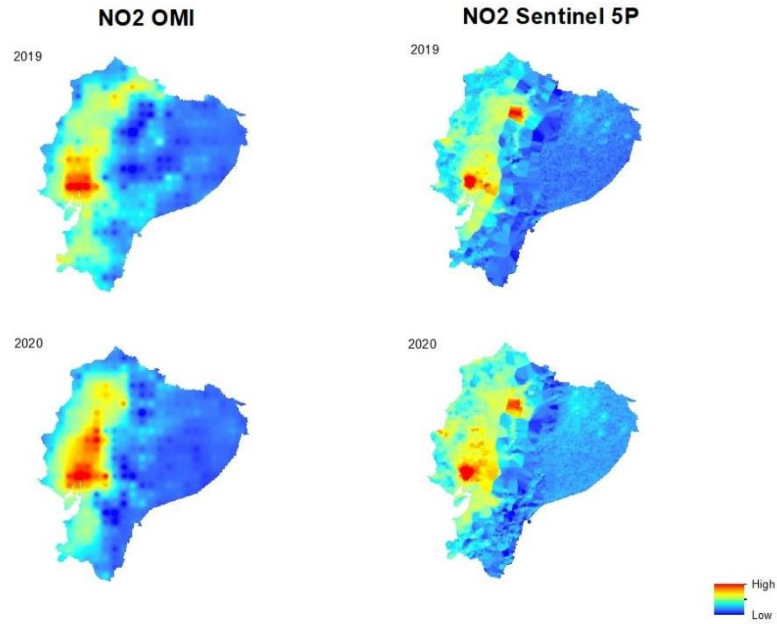
6.4 Mapas de concentración anual

En el mapa 6, se observa la concentración promedio anual de O_3 , durante el periodo de estudio, para cada producto satelital. Se puede evidenciar que Sentinel 5P (sensor TROPOMI) y MERRA-2 muestran una tendencia similar en lo que respecta a altas concentraciones en la región costa y oriente de la república del Ecuador. En cambio, AIRS presenta discrepancias especialmente en la región sierra, donde se muestran valores más altos de O_3 . Por otro lado, se evidencia que Sentinel 5P posee mayor detalle en la distribución de las mediciones.



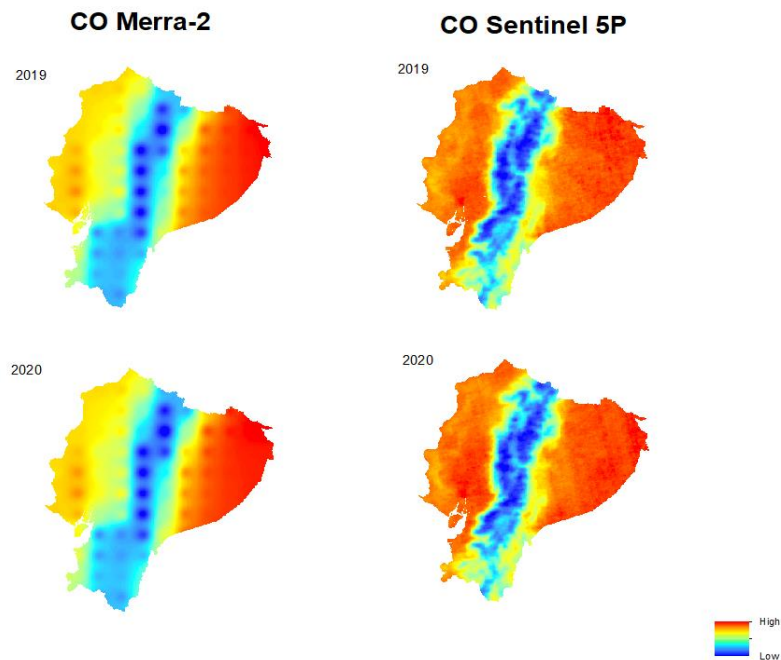
Mapa 6. Concentración promedio de 2019 y 2020 de O_3 de Sentinel 5P, MERRA-2 y AIRS.

El mapa 7 muestra el contraste que presentan los niveles de NO_2 de 2019 y 2020 entre OMI y Sentinel 5P (sensor TROPOMI). Se puede observar que ambos satélites coinciden en lo que respecta a concentraciones altas en la provincia del Guayas para los dos años de estudio. Sin embargo, Sentinel 5P (sensor TROPOMI) muestra focos más detallados del área de contaminación en esta provincia, además presenta la misma tendencia de altas concentraciones para Pichincha.



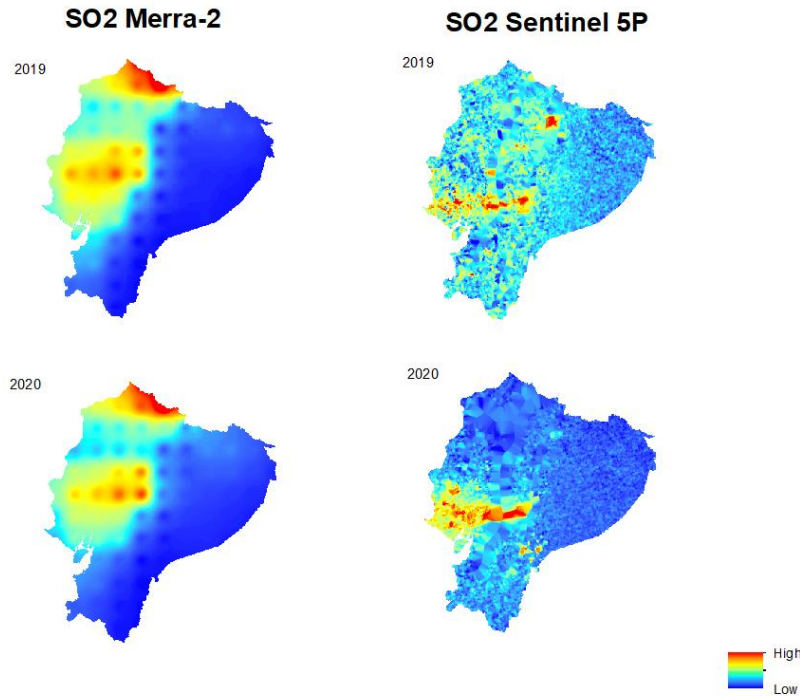
Mapa 7. Concentración promedio de 2019 y 2020 de NO₂ de Sentinel 5P y OMI.

El CO en el mapa 8 muestra una tendencia similar en el nivel de las concentraciones anuales de Sentinel 5P (Sensor TROPOMI) y MERRA-2, en 2019 y 2020; no obstante, Sentinel 5P se presentan valores más altos en la región costa y en el sur de la región sierra.



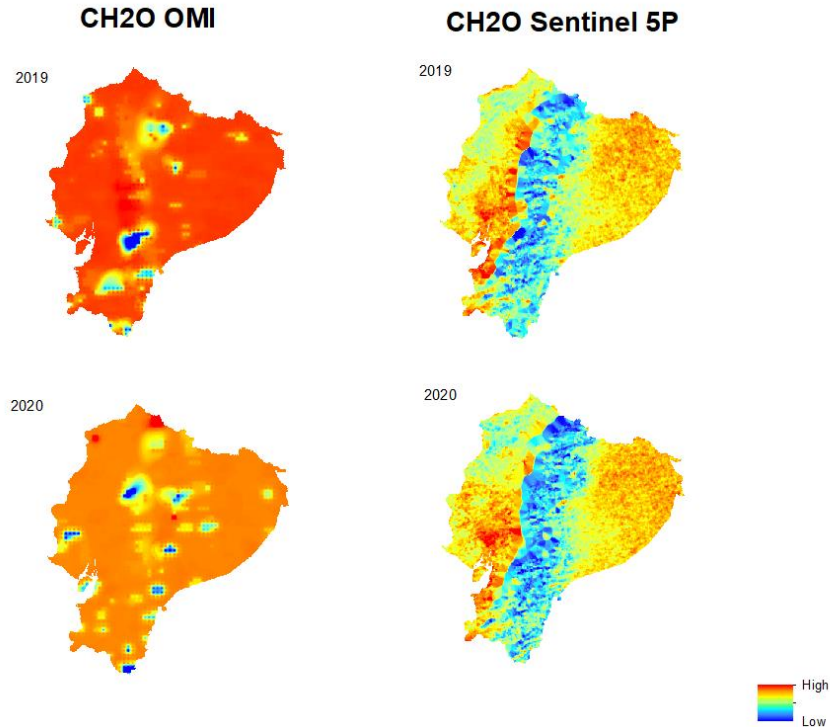
Mapa 8. Concentración promedio de 2019 y 2020 de CO Sentinel 5P y MERRA-2.

Los niveles de SO_2 de Sentinel 5P (sensor TROPOMI) y MERRA-2 se contrastan en el mapa 9, donde se evidencia valores altos en la región costa, específicamente en el área alrededor de la provincia del Guayas. Sin embargo Sentinel 5P proporciona un mayor detalle en la distribución de las concentraciones. Además MERRA-2 muestra sus valores más altos en la zona norte del país en los dos años, es decir, en las provincias de Esmeraldas y Carchi; donde Sentinel 5P presenta valores bajos.



Mapa 9. Concentración promedio del 2019 y 2020 de SO_2 de Sentinel 5P y MERRA-2.

En el mapa 10, se presentan mapas de la distribución de las concentraciones anuales de CH_2O para el 2019 y 2020. Sentinel 5P (sensor TROPOMI) muestra valores medios y uniformes en la costa y el oriente, y los valores más bajos en la región sierra. En cambio, OMI presenta una tendencia de valores altos en todo el territorio ecuatoriano para ambos años, con excepción a pequeños focos de concentraciones bajas.



Mapa 10. Concentración promedio de 2019 y 2020 de CH₂O Sentinel 5P y OMI.

6.5 Resultado de análisis de correlación con diferente tamaño de pixel

Los resultados de la correlación de Sentinel 5P aumentado su tamaño de píxel se observan en la tabla 8, mostrando un aumento en el coeficiente de determinación para todos los contaminantes, esto en comparación a los coeficientes que resultaron de la correlación con el tamaño de pixel a 1 km².

Para el CO se obtuvo un coeficiente de determinación R^2 igual a 0,9489, en el O₃ se obtuvieron valores de 0,8255 y 0,875 para MERRA-2 Y AIRS respectivamente, esto indica que se ajustan en gran magnitud al modelo ya que sus valores son cercanos a 1.

Contrario a los contaminantes mencionados con anterioridad, en el caso del NO₂, SO₂ y CH₂O se obtuvieron valores R^2 de 0,3065, 0,08812 y 0,0161 respectivamente, dándonos a entender un bajo ajuste al modelo ya que son cercanos a 0.



Tabla 7. Correlación de los valores de Sentinel 5P con OMI, MERRA-2 y AIRS aumentando el tamaño de pixel.

Tamaño de pixel (resample)	Satélite	Contaminante	R²
62,5 x 62,5 km	MERRA-2	CO	0,9489
		SO₂	0,08812
		O₃	0,8255
25 x 25 km	OMI	NO₂	0,3065
10 x 10 km		CH₂O	0,0161
100 x 100 km	AIRS	O₃	0,875

Elaboración: Autores



7. DISCUSIÓN

En la actualidad los avances en la teledetección junto con el interés sobre los impactos ambientales han incrementado el uso de sensores remotos como alternativa de medición de contaminantes atmosféricos (Jiménez et al., 2020); por lo tanto para estudios de calidad del aire se requiere de productos satelitales que posean datos representativos y confiables, es decir, precisión y detalle en la mediciones de las concentraciones.

La comparación de datos de NO_2 entre Sentinel 5P (Sensor TROPOMI) y OMI mostraron diferencias en la medición de este contaminante en base al coeficiente de determinación R^2 de 0,3721 calculado para el resample de 1 km^2 , similar al R^2 de 0,3065 en el resample a $25 \times 25 \text{ km}$; que representa una disparidad entre los valores de ambos satélites al cambiar la resolución espacial. La gráfica de serie de tiempo que compara estos dos satélites muestra rangos de mediciones similares a excepción enero, febrero y marzo del 2019 en el satélite OMI, donde presenta valores atípicos a la tendencia del resto de tiempo de estudio. Esto concuerda con un estudio realizado por Wang et al. (2020) que concluye que Sentinel 5P (Sensor TROPOMI) posee un rendimiento significativamente mejor para representar la variabilidad espacial debido a su mejor resolución. Por otro lado, OMI proporciona una distribución espacial más uniforme, sin embargo, posee muchas cuadrículas de ruido; lo que podría causar un sesgo en la medición de las concentraciones. Además en base a las diferencias de concentraciones, en la región sierra se encuentran las áreas donde mayor discrepancia tuvo las mediciones de los dos satélites.

Debido al periodo de vida corto del NO_2 en la troposfera y su disposición heterogénea, las distribuciones temporales y espaciales varían fuertemente; por lo tanto, la resolución espacial mejorada de Sentinel 5P (sensor TROPOMI) es muy importante y permite diferenciar las variaciones de concentración en grandes áreas urbanas. Por otro lado la relación señal-ruido en Sentinel 5P (sensor TROPOMI) es de 2 a 3 veces más alta que OMI, por consiguiente puede resolver mejor las fuentes de NO_2 y posee un umbral de detección más bajo que OMI (Veefkind et al., 2012).

Al comparar ambos sensores con estaciones en tierra, OMI presenta un R^2 aceptable, concordando con un estudio realizado por Paraschiv et al. (2017) que presenta valores de R^2



que oscilan entre 0,51 y 0,86; lo que se asemeja a 0,5363 calculado en nuestra investigación. Sin embargo, Sentinel 5P (Sensor TROPOMI) proporciona un mejor ajuste a los datos de tierra con un R^2 de 0,7297. En base al mapa 8 se evidencian focos de concentraciones altas de NO_2 de ambos sensores en las áreas de Quito y Guayaquil, esto es debido a que los niveles más altos de este contaminante se dan en las aglomeraciones urbanas y zonas metropolitanas por el alto tráfico vehicular (MITECO, 2002)

Para los formaldehidos se presentó un valor no significativo de R^2 0,0002785 en la escala de 1 km^2 y 0,0161 con el resample de $10 \times 10 \text{ km}$, que demuestra una diferencia significativa en los valores de ambos sensores. Además, en base a las series de tiempo donde se observa una disparidad entre en la temporalidad de los valores, se demuestra que Sentinel 5P (Sensor TROPOMI) proporciona concentraciones más detalladas de este contaminante.

Kleipool et al. (2018) determinan que las mediciones de CH_2O poseen errores en las densidades de la columna inclinada ajustadas (SCDE), que está directamente relacionada con la relación señal-ruido (SNR); desde este punto de vista Sentinel 5P (sensor TROPOMI) funciona significativamente mejor que OMI. De igual manera De Smedt et al. (2021) establece que Sentinel 5P (sensor TROPOMI) muestra una clara reducción del ruido en comparación con los sensores anteriores, lo que permite que se detecten señales de CH_2O más débiles y el monitoreo de sus variaciones en una escala de tiempo mucho más corta. Esto se corrobora en el mapa 10 donde se observan valores mucho más altos en las mediciones de OMI para el 2019 y 2020, en comparación con Sentinel 5P (sensor TROPOMI).

Para este contaminante, la diferencia de concentraciones muestra focos de valores muy altos a comparación del resto del área de estudio (mapa 2) y su coeficiente de dispersión fue el más alto, que representa que la distribución de datos es muy dispersa y no uniforme, corroborando los coeficientes de determinación bajos en ambos procesos de resample. Cabe recalcar que no se pudo obtener una comparación de concentraciones de CH_2O con mediciones de tierra debido a la ausencia de estaciones que cuantifiquen este contaminante en el país.

Con respecto al SO_2 , no existe una correlación entre las concentraciones medidas de Sentinel 5P (sensor TROPOMI) y MERRA-2, con un valor de coeficiente de determinación R^2 de



0,006461 en el resample a 1 km² y 0,08812 en el resample a 62,5 x 62,5 km; es decir, las concentraciones medidas entre los dos satélites discrepan. Al realizar la comparación de ambos satélites con estaciones de tierra se obtuvo un R² de 0,3604 y 0,3364 para Sentinel 5P (sensor TROPOMI) y MERRA-2, respectivamente, estos valores están lejos a 1 y representan un valor bajo al ajuste de modelo de correlación.

Con respecto a las diferencias de concentraciones se puede observar que dentro de la provincia del Guayas se encuentran los valores con mayores discrepancias con respecto a sus mediciones, por otro lado, los valores mínimos de diferencias se encuentran en la zona norte del país; el coeficiente de variación de las diferencias de las mediciones tuvo un valor de 0,62; representando una muestra muy dispersa entre los valores.

En base a la serie de tiempo del SO₂ que se muestra en la gráfica 4 se evidencia diferencias en la temporalidad de las concentraciones y además no existe un patrón de similitud en su distribución, donde Sentinel 5P (sensor TROPOMI) sobreestima los valores de las concentraciones del contaminante. En el mapa 9 se muestra los niveles concentración de SO₂ en el 2019 y 2020, donde se evidencia (en ambos productos satelitales) una alta concentración de SO₂ en la zona costera del país, especialmente en la provincia del Guayas, debido principalmente a las emisiones de las chimeneas de los barcos que atracan en el Puerto de Guayaquil (Pinos, 2015). Cabe recalcar que Sentinel 5P (sensor TROPOMI) muestra con mejor detalle los focos de contaminación a gran escala en comparación a MERRA-2 debido a su mayor resolución espacial.

En el análisis de O₃ correlacionando los productos satelitales Sentinel 5P (sensor TROPOMI), MERRA-2 y AIRS se obtuvieron coeficientes de correlación R² de 0,8165 y 0,8223, respectivamente, para el tamaño de pixel de 1km². Este valor es similar al resultado obtenido aumentando el tamaño de pixel a 62,5 x 62,5 km, para MERRA-2 y 100 x 100 km para AIRS con valores R² de 0,8255 y 0,875 respectivamente, lo cual es un resultado significativo positivo en ambos casos, demostrando la congruencia de los valores entre estos instrumentos de medición. Esto se puede corroborar de manera visual en el mapa 6, donde las concentraciones anuales de los tres satélites muestran similitud en su serie temporal.



La grafica 1 de serie de tiempo muestra un rango de valores similar, con la misma tendencia a lo largo de cada mes en sus concentraciones, tanto de Sentinel 5P, MERRA-2 y AIRS, demostrando de manera visual su alta correlación entre estos productos satelitales. En lo que respecta al promedio de las diferencias entre Sentinel 5P versus MERRA-2 y AIRS, se puede observar en el mapa 1, focos de diferencia altos en la zona de la amazonia, lo que concuerda con sus coeficientes de variación siendo más alto el valor para MERRA-2 con un 0,46, en relación con el 0,36 que presenta AIRS.

La semejanza de las mediciones de O_3 se debe en parte a que el tiempo de vida media de este gas suele llegar es de semanas y su transporte va a depender de las condiciones meteorológicas (MITECO, 2002). De igual manera al ser un contaminante secundario, depende de varios factores para su formación como lo son la combustión de los combustibles fósiles y la acción de la radiación solar sobre los contaminantes producidos en esa reacción, así como lo demuestra el estudio realizado por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología Y Estudios Ambientales) en Bogotá Colombia, donde se observa una disminución de las concentraciones en las primeras horas de la mañana y aumentando hacia el mediodía con un pico a las 12 de la tarde, para volver a disminuir a medida que la radiación solar disminuye (IDEAM, 2001).

Por lo mencionado anteriormente se hace posible la obtención de valores similares entre los distintos productos satelitales tratados en este estudio, sin tener gran interferencia la resolución satelital que cada producto tiene.

La tabla 5 muestra un R^2 igual a 0,4154, obtenido para el CO entre Sentinel 5P (sensor TROPOMI) y MERRA-2 a 1km^2 , que se acerca más al valor de 0. Sin embargo, este valor es más alto en comparación a los coeficientes de determinación de los demás contaminantes, exceptuando el O_3 . Por otro lado para el aumento de pixel a $62,5 \times 62,5 \text{ km}$ se obtuvo un coeficiente R^2 igual a 0,9489, dándonos una referencia de la mayor adaptabilidad de los datos espaciales de Sentinel 5P al aumentar su tamaño de pixel, en relación con MERRA-2.

Al analizar los valores en puntos específicos de las imágenes satelitales y compararlas con valores de estaciones en tierra ubicadas en las ciudades de Quito y Cuenca se obtuvo un coeficiente R^2 igual a 0,8973 y 0,9035 para Sentinel 5P y MERRA-2 respectivamente, lo cual



se asemeja al estudio realizado por Mahesh Kumar Sha et al. (2021) con un valor R^2 superior a 0,9. Por consiguiente se demuestra que existe concordancia en las mediciones de tierra y estos dos satélites.

Como se observa en la gráfica 2, en la serie de tiempo de CO, Sentinel 5P (sensor TROPOMI) se muestran valores ligeramente más elevados que MERRA-2, pero la tendencia de las concentraciones y los picos máximos y mínimos siguen un patrón similar en ambos satélites, identificando los meses más y menos contaminados. Existe una diferencia considerable con respecto a la resolución espacial entre los dos satélites llevando a cabo que exista mayor precisión en la medición de las concentraciones de CO en el país, como se evidencia en el mapa 8, donde los mapas de Sentinel 5P poseen un mayor detalle en la distribución del contaminante en comparación con MERRA-2.

En lo que respecta a las diferencias de concentraciones entre los 2 sensores mencionados con anterioridad, se puede observar en el mapa 3, valores bajos de en el rango de diferencias de concentraciones concordando con su coeficiente de variación igual a 0,29.



8. CONCLUSIONES

La metodología aplicada para realizar el resample del tamaño del píxel facilita la distribución de los datos en imágenes que sufren pérdida de píxeles por interferencia de nubes o diferentes condiciones meteorológicas en el área de estudio. Sin embargo al realizar un cambio muy grande de tamaño de píxel se puede causar un sesgo en los datos intermedios que se interpolan, además de generarse extremos locales en los puntos que proporciona la imagen.

Se logró el modelamiento de los datos, donde se correlacionó las concentraciones de CO, SO₂, NO₂, O₃, CH₂O; obteniendo para el O₃ un R² significativo entre las mediciones de Sentinel 5P (sensor TROPOMI) validándolo con MERRA-2 y AIRS, el CO y NO₂ mostraron una correlación media, sin embargo en estos tres contaminantes el coeficiente de correlación R² subió al cambiar el resample del tamaño del píxel lo que concluye que Sentinel 5P posee una mayor adaptabilidad de datos espaciales al aumentar su tamaño de píxel.

En el SO₂ y CH₂O se presentaron valores bajos en sus coeficientes de determinación no mostraron una correlación positiva que se ajuste al modelo, lo que concluye que Sentinel 5P (sensor TROPOMI) proporciona datos de mayor calidad y detalle con respecto a sus predecesores por su resolución temporal que proporciona mayor frecuencia en la medición de los datos y principalmente su resolución espacial que evita que existan valores erróneos al interpolar los valores.

Las concentraciones representadas gráficamente en las series de tiempo corroboran las correlaciones obtenidas, siendo el O₃ el único contaminante que tuvo un coeficiente de determinación aceptable. Además se observó que el CO y NO₂, a pesar de poseer un coeficiente de correlación medio entre satélites, sus concentraciones con respecto a cada mes en los dos años siguen una distribución semejante referente a los meses con picos máximos y mínimos de contaminación. En lo que respecta a SO₂ y CH₂O, sus gráficas de series de tiempo demostraron discrepancia y valores completamente diferentes en sus concentraciones.

Analizando la validez de Sentinel 5P se concluye que posee un mayor detalle y exactitud en la medida de las concentraciones de contaminantes a comparación de sus productos satelitales predecesores. Por lo tanto este sensor remoto proporciona datos de mayor



credibilidad y sus recuperaciones son valiosas para complementar datos del Ecuador, debido a que el país no cuenta con una red completa de monitoreo de este tipo de gases.

9. RECOMENDACIONES

Una de las limitaciones del estudio fue que las estaciones de monitoreo de contaminantes atmosféricos se encontraban únicamente en la ciudad de Cuenca y Quito. Todo esto impidió que se pueda realizar una comparación de concentraciones en las demás ciudades y regiones del país.

Además no existen estaciones de monitoreo de CH_2O en el Ecuador, lo que imposibilitó que se pueda hacer la validación de datos los productos satelitales con respecto a este contaminante.

Para futuras investigaciones se recomienda realizar una comparación entre los métodos de interpolación de datos, específicamente en la metodología de resample de pixeles que se utilizó en este estudio, ya que no existen investigaciones que validen dichos métodos en este contexto; de esta forma se podrá conocer el más adecuado con respecto a la interpolación de contaminantes atmosféricos.



10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alejandrina, G. P., Anselmo, G. F. I., Benjamín, S. G., Pilar, F. H., María, G. M. R., Carlos, B. Y. J., Ángel, P. P. J., Reyes, N. P., & Senén, D. A. J. (2012). Contaminación atmosférica. Editorial UNED.

Alejo, D., Morales-Pérez, M. C., Van-Espen, P., Torre-López, J. B. de la, Quintero-Alonso, H., Sosa-Rodríguez, D., & Nuñez-Caraballo, V. (2011). CUANTIFICACIÓN DE DIÓXIDO DE NITRÓGENO CON CAPTADORES PASIVOS TIPO RADIELLO. *Revista Cubana de Química*, XXIII(2), 66–71. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543723010>

Almela, M. (2019). Cómo se interpreta un Diagrama de Cajas y Bigotes? *analisisdedatos*. <https://www.analisisdedatos.org/single-post/2019/04/05/cómo-se-interpreta-un-diagrama-de-cajas-y-bigotes>

Alonso, F. (2006). Cartografía y Geodesia. Sistemas de proyección. *Sistemas de Información Geográfica*, 7–31. http://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario_1.pdf

Alvarado, X. (2006). Impacto en la salud ambiental por efecto de emisiones de dióxido de azufre del Volcán Arenal, en la población de la Fortuna de San Carlos. *Rev. Costarric. Salud Pública*, 15(29), 25–34. https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S1409-14292006000200004&script=sci_arttext.

Arboleda, A. S., & Vásquez Taco, J. D. (2021). EVALUACIÓN DE DATOS SATELITALES DEL SENSOR DE CALIDAD DE AIRE TROPOMI - SENTINEL 5P PARA EL ECUADOR ENTRE LOS AÑOS 2018 A 2020. Tesis, 1–100. <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>

Arias, M. M., & Molina, M. (2017). ¿Qué significa realmente el valor de p? *Pediatría Atención Primaria*, 19(76), 377–381. https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1139-76322017000500014&lng=es&nrm=iso&tlng=es



- ATSDR. (1999). Resumen de Salud Pública Formaldehído. www.atsdr.cdc.gov/es
- Ballester, F. (2005). Contaminación atmosférica, cambio climático y salud. In *Revista Española de Salud Pública* (Vol. 79, Issue 2, pp. 159–175). <https://doi.org/10.1590/S1135-57272005000200005>
- Bella, C.M. Di, & Posse, G., & Beget, M.E., & Fischer, M.A., & Mari, N., & Veron, S. (2008). La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones. *Ecosistemas*, 17(3),39-52. ISSN: 1132-6344. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=54017106004>
- Bermejo, V., Alonso del Amo, R., Elvira Cozar, S., Rábago Juan-Aracil, I., & García Vivanco Instituciones colaboradoras, M. (2009). El ozono troposférico y sus efectos en la vegetación. MITECO.
- 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>
- Borsese, A., & Esteban, S. (2005). Química, educación ambiental y vida cotidiana: el ozono troposférico. *Enseñanza de Las Ciencias: Revista de Investigación y Experiencias Didácticas*, 23(2), 251–262. <https://raco.cat/index.php/Ensenanza/article/view/22022>
- Bremer, M. H., Lozano García, D. F., Rodríguez García, M., & Hori Ochoa, M. del C. (2016). Caracterización de niveles de contaminación en una planta extractora de azufre utilizando imágenes de satélite de alta resolución para optimizar el plan de muestreo. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32(2), 165–176. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.02.03>
- Carnicer, J. M. (2008). *Contaminación Atmosférica* (1st ed.). Escuela de Organización Industrial.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección Ambiental* (p. 576). Ariel Ciencia.



Consorcio Sanitario de Barcelona. (2010). Los óxidos de nitrógeno en el aire urbano y la salud (p. 1). Consorcio Sanitario de Barcelona. http://www.aspb.cat/quefem/documents_qualitat_aire.htm Organización Mundial de la Salud

De León, G. D., Pinedo Álvarez, A., Martínez Guerrero, J. H. (2014). Aplicación de sensores remotos en el análisis de la fragmentación del paisaje en Cuchillas de la Zarca, México. *Investigaciones geográficas*, 84, 42–53. <https://doi.org/10.14350/rig.36568>.

De Smedt, I., Pinardi, G., Vigouroux, C., Compernelle, S., Bais, A., Benavent, N., Boersma, F., Chan, K. L., Donner, S., Eichmann, K. U., Hedelt, P., Hendrick, F., Irie, H., Kumar, V., Lambert, J. C., Langerock, B., Lerot, C., Liu, C., Loyola, D., ... Van Roozendaal, M. (2021). Comparative assessment of TROPOMI and OMI formaldehyde observations and validation against MAX-DOAS network column measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(16), 12561–12593. <https://doi.org/10.5194/ACP-21-12561-2021>

Delgado, J. M. (2005). Validación e implementación de técnicas de captación pasiva para el estudio de los niveles y efectos de ozono troposférico y dióxido de nitrógeno en un área costera mediterránea. TDX (Tesis Doctorals En Xarxa). <http://repositori.uji.es/xmlui/handle/10803/10539>

Díaz, I. (2004). Sensores Sistemas Automáticos (p. 14). Universidad de Oviedo. <http://isa.uniovi.es/~idiaz/SA/Teoria/04-05/SA.Sensores.pdf>

Earth Engine Data Catalog. (2018). Sentinel Collections in Earth Engine | Earth Engine Data Catalog. Sentinel Collection. <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentinel-5p>

EMOV. (2020). EMOV - monitoreo. Monitoreo En El Aire. <http://caire.emov.gob.ec/monitoreo/pages/stations.xhtml;jsessionid=SFbwhSw-7Ln-jNCBLFNtdXONMsInTe7p30W8dGY.srv-app-lnxdb>

ESA. (n.d.). Sentinel-5P - Misiones - Sentinel Online - Sentinel. Www.Esa.Int. Retrieved March 31, 2021, from <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p>



Forero, D. D. (2019). Metodología para la incorporación de datos del sensor TROPOMI del satélite Sentinel 5-P al monitoreo de la calidad del aire en Bogotá D.C. 96.

Garcés, L., & Hernández Ángel, M. (2004). La lluvia ácida: un fenómeno fisicoquímico de ocurrencia local. *Revista Lasallista de Investigación*, 1(2), 67–72.

García, J. A., Grutter, M., & Cintora-Juárez, D. (2007). Evaluación del riesgo por contaminantes criterio y formaldehído en la Ciudad de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 23(4), 169–175.
http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992007000400002

Guamán Pintado, P. M. (2019). Análisis de los métodos de interpolación en la distribución espacial de los contaminantes ozono y material particulado menor a 10 micras y su relación con enfermedades alérgicas en niños de 3 a 5 años de edad en el área urbana de la ciudad de Cuenca. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/31864>.

Gutiérrez, A., Ferrero, A., Estarlich, M., Esplugues, A., Iñiguez, C., & Ballester, F. (2018). Exposición ambiental a dióxido de nitrógeno y salud respiratoria a los 2 años en la Cohorte INMA-Valencia. *Gaceta Sanitaria*, 32(6), 507–512.
<https://doi.org/10.1016/j.gaceta.2017.05.012>

Hidalgo, M. (2017). Variabilidad climática interanual sobre el Ecuador asociada a ENOS. *CienciAmérica*, 6(2), 32–37.

Ialongo, I., Virta, H., Eskes, H., Hovila, J., & Douros, J. (2020). Comparison of TROPOMI/Sentinel-5 Precursor NO₂ observations with ground-based measurements in Helsinki. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13(1), 205–218.
<https://doi.org/10.5194/amt-13-205-2020>

Hernández, S. (2020). Estadística: Coeficiente de variación. Universidad Autónoma Del Estado de Hidalgo.



Instituto Politécnico Nacional. (2019). Percepción remota. *Gaceta Politécnica*, 11(124), 68. http://soda.ustadistancia.edu.co/enlinea/hugoladino_fotointerpretacionysensores/percepcin_remota.html

Jensen, J.R. (1996) *Introductory Digital Image Processing A Remote Sensing Perspective*. 2nd Edition, Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ. - References - Scientific Research Publishing

Jiménez, A. M., Torrecilla, R. C., & Arranz, D. M. (2020). Particulate matter concentration in the air: Statistical analysis of spatial relations between surface and MODIS data for two weather types in the Madrid region. *Investigaciones Geográficas*, 73, 189–209. <https://doi.org/10.14198/INGEO2020.MJCTMA>

Khalil, M. A. K., & Rasmussen, R. A. (1990). The global cycle of carbon monoxide: Trends and mass balance. *Chemosphere*, 20(1–2), 227–242. [https://doi.org/10.1016/0045-6535\(90\)90098-E](https://doi.org/10.1016/0045-6535(90)90098-E)

Kleipool, Q., Ludewig, A., Babic, L. a., Bartstra, R., Braak, R., Dierssen, W., Dewitte, P. J., Kenter, P., Landzaat, R., Leloux, J., Loots, E., Meijering, P., Van Der Plas, E., Rozemeijer, N., Schepers, D., Schiavini, D., Smeets, J., Vacanti, G., Vonk, F., & Veefkind, P. (2018). Pre-launch calibration results of the TROPOMI payload on-board the Sentinel-5 Precursor satellite. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(12), 6439–6479. <https://doi.org/10.5194/AMT-11-6439-2018>

López, I., & Sergio, V. (n.d.). Predicciones de cambio climático en La Rioja a partir de modelos regionales: estimaciones para finales del siglo XXI - Dialnet. Dialnet. Retrieved March 25, 2021, from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2768927>

Ministerio del Ambiente de Ecuador. (2011). Norma de calidad del aire ambiente o nivel de inmisión - Acuerdo Ministerial 050. Reforma al Libro IV del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente. Retrieved from <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/10/Acuerdo-50- NCA.pdf>.



Miranzo, M., & del Río, C. (2015). Las consecuencias del cambio climático en el magreb. *UNISCI Discussion Papers*, 2015(39), 127–150. https://doi.org/10.5209/rev_runi.2015.n39.51817

Mitas, L., Mitsova, H., 1999, Spatial Interpolation. In: P. Longley, M.F. Goodchild, D.J. Maguire D.W. Rhind (Eds.), *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications*, GeoInformation International, Wiley, 481-492

MITECO. (2002). Óxidos de Nitrógeno. División de Toxicología ToxFAQs, 1, 2. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/oxidos-nitrogeno.aspx>

MITECO. (2002). Ozono ToxFAQs, 1, 2. <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/calidad-del-aire/salud/ozono.aspx>

Modeling Global and Assimilation Office. (2019). MERRA-2. National Aeronautics and Space Administration (NASA). <https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>

Moreno, P., Manuel, J., Poo, R., & Soberon, A. (2017). *ECONOMETRÍA: El Modelo de Regresión Lineal Simple*. Universidad de Cantabria.

NASA-Earth Data. (2018). *Ges Disc*. 1–75. <https://disc.gsfc.nasa.gov/>

Núñez, V., Rodríguez, R., Gómez, L., Herrera, I., & Morales, M. (2019). Emisiones de dióxido de azufre a la atmósfera por fuentes fijas del MINAG y su influencia en la calidad del aire en la provincia de Villa Clara. *Centro Agrícola*, 46(3), 10. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0253-57852019000300086

Orantes, A. G., & García, C. M. (2010). *Técnicas de monitoreo atmosféricos*.

OZONO TROPOSFÉRICO - IDEAM. (2001). Recuperado el 15 de noviembre de 2021, de <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/ozono-troposferico>

Paraschiv, S., Constantin, D.-E., Paraschiv, S.-L., & Voiculescu, M. (2017). OMI and Ground-Based In-Situ Tropospheric Nitrogen Dioxide Observations over Several Important



European Cities during 2005–2014. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/IJERPH14111415>

Peñalver, M. A., Mazón Cuadrado, L. C., & Berrocal Fernández, P. (2017). Control del formaldehído, xileno y compuestos orgánicos volátiles mediante el sistema integral de friocongelación y fotocatalización. *Medicina y Seguridad Del Trabajo*, 63(249), 319–330. https://scielo.isciii.es/scielo.php?pid=S0465-546X2017000400319&script=sci_arttext&tlng=pt

Peralta, J., Lopez, Á., Barriga, A., Sosa, I., & Delgado, E. (2013). Análisis estadístico de la información meteorológica para la explotación de energías renovables en el Ecuador. *Primer Congreso Internacional y Expo Científica Investigación Sostenible: Energías Renovables y Eficiencia Energética*, 1–9. https://www.researchgate.net/publication/262420217_Analisis_estadistico_de_la_informacion_meteorologica_para_la_explotacion_de_energias_renovables_en_el_Ecuador

Pérez, D. (2007). *Introducción a los Sensores Remotos - Aplicaciones en Geología*. Departamento de Ciencias Geológicas, FCEN, UBA, 09.

Pinos, O. Q. (Afectaciones Referenciales Del SO₂ En El Ecosistema Del Manglar Del Puerto De Guayaquil. *UCSG*, 16, 62–66.

QGIS 2.14. (2019). Análisis Espacial (Interpolación). https://docs.qgis.org/2.14/es/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html

Querétaro, C. de monitoreo de calidad del aire del E. de. (2006). Ozono (O₃). In *Le piante el'inquinamento dell'aria* (pp. 81–104). https://doi.org/10.1007/88-470-0384-9_4

Rojas, M. N., & Nájera, A. (2011). Una alternativa para el tratamiento de lixiviados maduros generados en el relleno sanitario de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México [Universidad Autónoma de México]. https://www.researchgate.net/publication/265050517_Una_alternativa_para_el_tratamiento



_de_lixiviados_maduros_generados_en_el_relleno_sanitario_de_Tuxtla_Gutierrez_Chiapas
_Mexico

Sarría, F. A. (2006). *Sistemas de Información Geográfica*. 239.

Secretaria del Ambiente MDMQ (2019). Red de monitoreo atmosférico. In Red de Monitoreo Atmosférico. <http://www.quitoambiente.gob.ec/index.php/politicas-y-planeacion-ambiental/red-de-monitoreo>

Sha, M. K., Langerock, B., Blavier, J.-F. L., Blumenstock, T., Borsdorff, T., Buschmann, M., Dehn, A., De Mazière, M., Deutscher, N. M., Feist, D. G., García, O. E., Griffith, D. W. T., Grutter, M., Hannigan, J. W., Hase, F., Heikkinen, P., Hermans, C., Iraci, L. T., Jeseck, P., ... Zhou, M. (2021). Validation of methane and carbon monoxide from Sentinel-5 Precursor using TCCON and NDACC-IRWG stations. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(9), 6249–6304. <https://doi.org/10.5194/amt-14-6249-2021>

Sin, M. (2014). PROYECTO FINAL DE CARRERA INSTALACIÓN Y ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE LIMPIEZA DE GASES DE ESCAPE PARA UN BUQUE RO-RO INGENIERÍA TÉCNICA NAVAL.

Téllez, J., Rodríguez, A., & Fajardo, Á. (2006). Contaminación por monóxido de carbono: un problema de salud ambiental. *Revista de Salud Pública*, 8(1), 108–117. <https://doi.org/10.1590/s0124-00642006000100010>

Veefkind, J. P., Aben, I., McMullan, K., Förster, H., de Vries, J., Otter, G., Claas, J., Eskes, H. J., de Haan, J. F., Kleipool, Q., van Weele, M., Hasekamp, O., Hoogeveen, R., Landgraf, J., Snel, R., Tol, P., Ingmann, P., Voors, R., Kruizinga, B., Levelt, P. F. (2012). TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment*, 120, 70–83. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2011.09.027>

Verhoelst, T., Compernelle, S., Pinardi, G., Lambert, J. C., Eskes, H. J., Eichmann, K. U., Fjæraa, A. M., Granville, J., Niemeijer, S., Cede, A., Tiefengraber, M., Hendrick, F.,



Pazmiño, A., Bais, A., Bazureau, A., Folkert Boersma, K., Bogner, K., Dehn, A., Donner, S., ... Zehner, C. (2021). Ground-based validation of the Copernicus Sentinel-5P TROPOMI NO₂ measurements with the NDACC ZSL-DOAS, MAX-DOAS and Pandonia global networks. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(1), 481–510. <https://doi.org/10.5194/amt-14-481-2021>

Vila, A., Sedano, M., López, A., & Juan, A. (2004). Correlación lineal y análisis de regresión. Academia.Edu. <https://www.academia.edu/download/34840793/RegresionLineal.pdf>

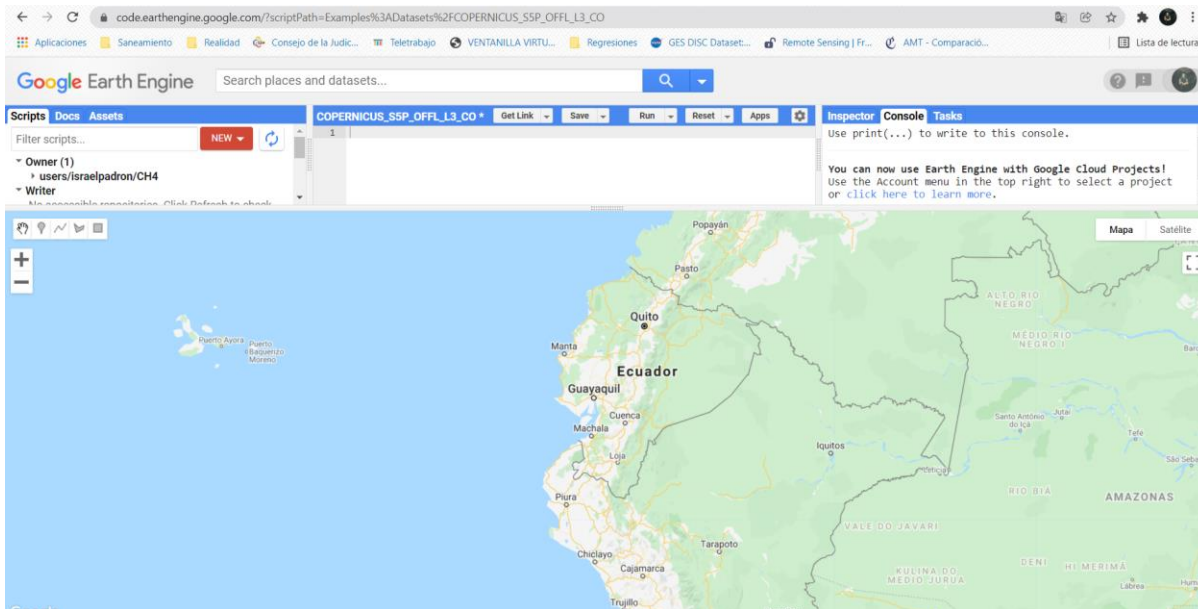
Wang, C., Wang, T., Wang, P., & Rakitin, V. (2020). Comparison and validation of TROPOMI and OMI NO₂ observations over China. *Atmosphere*, 11(6). <https://doi.org/10.3390/atmos11060636>

Wang, H., Souri, A. H., González Abad, G., Liu, X., and Chance, K. (2019): Ozone Monitoring Instrument (OMI) Total Column Water Vapor version 4 validation and applications, *Atmos. Meas. Tech.*, 12, 5183–5199, <https://doi.org/10.5194/amt-12-5183-2019>, 2019.

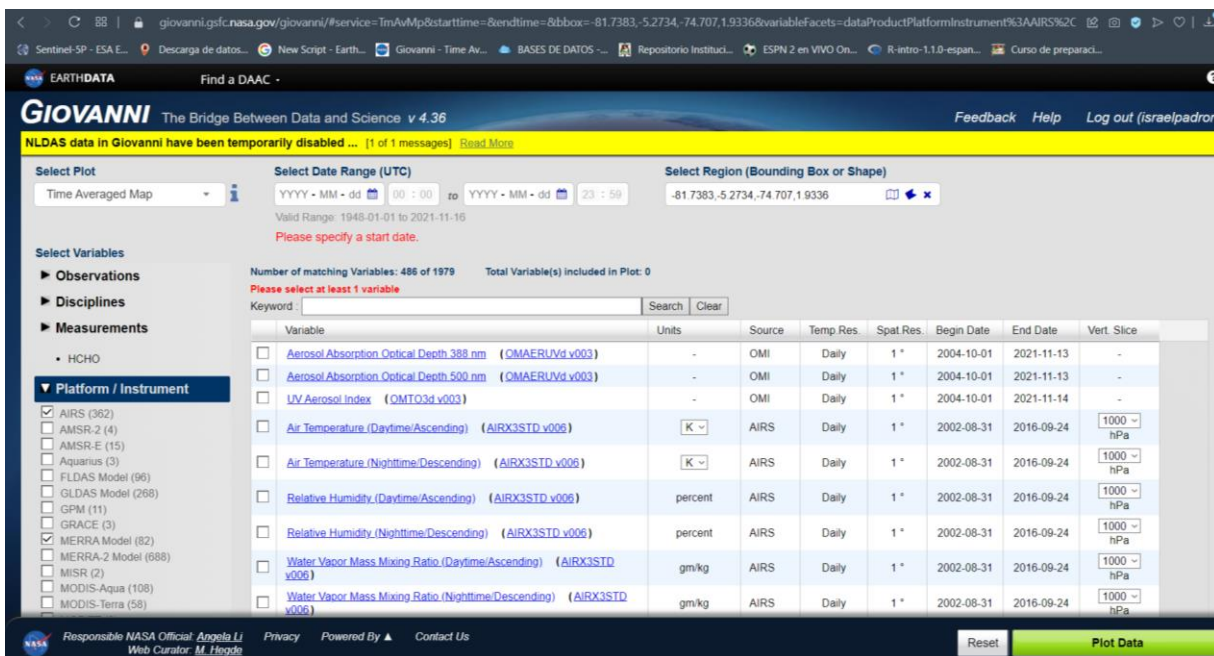
Zheng, Z., Yang, Z., Wu, Z., & Marinello, F. (2019). Spatial variation of NO₂ and its impact factors in China: An application of sentinel-5P products. *Remote Sensing*, 11(16), 1–24. <https://doi.org/10.3390/rs11161939>

11. ANEXOS

Anexo 1. Plataforma Google Earth Engine



Anexo 2. Plataforma GIOVANNI NASA





Anexo 3. Script de programación para descarga de datos de SO₂ en Google Earth Engine

```
//Datos Sentinel 5P para SO2
var SO2 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_SO2')
  .filterDate('2019-01-01', '2019-01-31'); //Selección de periodo temporal
//Datos para columna de SO2
var SentinelSO2 = SO2
  .select('SO2_column_number_density')
  .filterBounds (geometry);
var SO2Data = ee.Image(SentinelSO2.median());
var SO2Clip = SO2Data.clip (geometry);
Map.addLayer (SO2Clip, {
  max: 0.05,
  min: 0.0,
  palette: ['black', 'blue', 'purple', 'cyan', 'green', 'yellow', 'red']},
  'SO2');

print(SentinelSO2.size());

// put all dates in a list
var dates = ee.List(SentinelSO2.aggregate_array("system:time_start"))
  .map(function(d) { return ee.Date(d)});

// print a list with dates
print(dates);

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

Anexo 4. Script de programación para descarga de datos de NO₂ en Google Earth Engine

```
//Datos Sentinel 5P para NO2
var NO2 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_NO2")
  .filterDate('2020-03-29', '2020-03-30'); //Selección de periodo temporal

//Datos para columna NO2 Total
var SentinelNO2Total = NO2
  .select('NO2_column_number_density')
  .filterBounds (geometry);
var NO2TotalData = ee.Image(SentinelNO2Total.median());
var NO2TotalClip = NO2TotalData.clip (geometry);
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: geometry});
```




Anexo 5. Script de programación para descarga de datos de O₃ en Google Earth Engine.

```
//Datos Sentinel 5P para O3
var O3 = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_O3")
  .filterDate('2020-03-25', '2020-03-26'); //Selección de periodo temporal

//Datos para columna de O3 ozono
var SentinelO3 = O3
  .select('O3_column_number_density')
  .filterBounds (geometry);
var O3Data = ee.Image(SentinelO3.median());
var O3Clip = O3Data.clip (geometry);
Map.addLayer (O3Clip, {
  max: 0.12,
  min: 0.15,
  palette: ["black", "blue", "purple", "cyan", "green", "yellow", "red"]},
  'O3');
Export.image.toDrive({
  image: O3Clip.select("O3_column_number_density"),
  description: 'O3',
  scale: 1100,
  region: geometry});

print(SentinelO3.size());

// put all dates in a list
var dates = ee.List(SentinelO3.aggregate_array("system:time_start"))
  .map(function(d) { return ee.Date(d)});

// print a list with dates
print(dates);
```

Anexo 6. Script de programación para descarga de datos de CH₂O en Google Earth Engine.

```
HCHO
//Datos Sentinel 5P para HCHO
var HCHO = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_HCHO')
  .filterDate('2020-04-12', '2020-04-13'); //Selección de periodo temporal

//Datos para columna de HCHO
var SentinelHCHO = HCHO
  .select('tropospheric_HCHO_column_number_density')
  .filterBounds (geometry);
var HCHOData = ee.Image(SentinelHCHO.median());
var HCHOClip = HCHOData.clip (geometry);
Map.addLayer (HCHOClip, {
  max: 0.0005,
  min: 0.0,
  palette: ["black", "blue", "purple", "cyan", "green", "yellow", "red"]},
  'HCHO');
Export.image.toDrive({
  image: HCHOClip.select("tropospheric_HCHO_column_number_density"),
  description: 'HCHO',
  scale: 1100,
  region: geometry});
print(SentinelHCHO.size());
// put all dates in a list
var dates = ee.List(SentinelHCHO.aggregate_array("system:time_start"))
  .map(function(d) { return ee.Date(d)});

// print a list with dates
print(dates);
```



Anexo 7. Script de programación para descarga de datos de CO en Google Earth Engine.

```
//Datos Sentinel 5P para CO
var CO = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S5P/OFF/L3_CO")
  .filterDate('2020-03-23', '2020-03-24'); //Selección de periodo temporal

//Datos para columna de CO
var SentinelCO = CO
  .select('CO_column_number_density')
  .filterBounds (geometry);
var COData = ee.Image(SentinelCO.median());
var COclip = COData.clip (geometry);
Map.addLayer (COclip, {
  max: 0.05,
  min: 0.0,
  palette: ["black", "blue", "purple", "cyan", "green", "yellow", "red"]},
  'CO');
Export.image.toDrive({
  image: COclip.select("CO_column_number_density"),
  description: 'CO',
  scale: 1100,
  region: geometry});
print(SentinelCO.size());
// put all dates in a list
var dates = ee.List(SentinelCO.aggregate_array("system:time_start"))
  .map(function(d) { return ee.Date(d)});

// print a list with dates
print(dates);
```

Anexo 8. Muestra de cien primeros datos de CH₂O.

Sentinel 5P	OMI	Fecha	Sentinel 5P	OMI	Fecha
55	135,9227824	01_2019	81,1	115,6189189	01_2019
57,6	134,9559471	01_2019	83	115,2776546	01_2019
62,9	136,7245218	01_2019	81,8	114,7414292	01_2019
57,9	135,0788575	01_2019	81	114,0519469	01_2019
61,9	137,41067	01_2019	80,5	113,3723513	01_2019
64,6	139,8108066	01_2019	78,7	112,7703157	01_2019
73,5	134,0196009	01_2019	76,7	112,2616375	01_2019
66,1	136,7268397	01_2019	78,2	111,7824589	01_2019
72,5	139,3805621	01_2019	75,7	109,5695362	01_2019
70,1	140,8205763	01_2019	90,8	109,6252903	01_2019
76	132,1777541	01_2019	83,3	111,1563797	01_2019
74,3	134,6542206	01_2019	83	111,0136424	01_2019
76	136,9279788	01_2019	84,4	110,8526206	01_2019
81,5	137,8053438	01_2019	90,1	110,1901416	01_2019
79,5	137,3596853	01_2019	88,8	109,9686497	01_2019
81,9	134,6799402	01_2019	81,4	108,0144567	01_2019
77,5	126,7063901	01_2019	80,3	107,4206497	01_2019
73,1	128,1139985	01_2019	79,6	106,8397693	01_2019
70,5	130,1599619	01_2019	79,4	106,3927469	01_2019
83,1	131,8352774	01_2019	81,5	106,164542	01_2019
85	132,8036728	01_2019	76,5	106,0789763	01_2019
90	132,0124442	01_2019	75,6	107,4370799	01_2019
88,9	129,7510777	01_2019	65,3	107,2507842	01_2019
84	126,8859283	01_2019	45,7	106,2824511	01_2019
80,1	124,2147504	01_2019	46,1	106,2671798	01_2019
74,6	123,5479388	01_2019	84,9	106,3187082	01_2019
71,8	123,3912051	01_2019	81,6	107,7452965	01_2019
70,7	124,2768787	01_2019	93,2	107,5587601	01_2019
82,6	125,1276771	01_2019	82,5	107,4020531	01_2019
85,8	126,3616044	01_2019	82,7	106,8928311	01_2019
93,7	126,8845108	01_2019	84,6	106,7609165	01_2019
89,4	126,2552847	01_2019	84,6	104,9756084	01_2019
83,7	124,69121	01_2019	81	104,4425746	01_2019
81,1	122,6962133	01_2019	81	103,9342887	01_2019



75,9	120,7873618	01_2019	83,1	103,5734649	01_2019
73,9	119,2997953	01_2019	85,4	103,4459009	01_2019
74,1	119,678538	01_2019	84,9	103,4836022	01_2019
78,5	120,0819485	01_2019	81,6	104,9047168	01_2019
93	120,2332174	01_2019	81,2	104,8191421	01_2019
84,9	120,8158451	01_2019	75,4	103,4204665	01_2019
84,6	120,9996981	01_2019	46,7	103,2864837	01_2019
80,8	120,5231673	01_2019	44,9	103,4848592	01_2019
79,5	119,545625	01_2019	77,4	103,7923716	01_2019
76,1	118,2978617	01_2019	78,6	104,1907629	01_2019
76,4	117,0802488	01_2019	91,9	105,4232549	01_2019
78,4	116,0843061	01_2019	103,9	105,4236828	01_2019
76,7	115,8386546	01_2019	82,8	105,0261651	01_2019
100,5	115,8670933	01_2019	83,7	104,7073665	01_2019
83,6	115,5288423	01_2019	85,1	102,8308139	01_2019
89	115,6557377	01_2019	85,4	102,0363045	01_2019

Anexo 9. Muestra de cien primeros datos de NO₂.

Sentinel 5P	OMI	Fecha	Sentinel 5P	OMI	Fecha
5,6	31,435488	01_2019	9,5	32,2835805	01_2019
5,6	31,5096978	01_2019	9,8	32,3843396	01_2019
6,2	31,5669443	01_2019	10,3	32,5085523	01_2019
5,6	31,632785	01_2019	10,5	32,6538917	01_2019
6,7	31,6972215	01_2019	10,7	32,8173912	01_2019
8,8	31,6859104	01_2019	11,5	32,9959151	01_2019
7,3	31,7422275	01_2019	11,7	33,1864632	01_2019
6,9	31,7967905	01_2019	11,4	32,048481	01_2019
9,4	31,8543289	01_2019	10,7	32,0693982	01_2019
10,6	31,6477624	01_2019	9,9	32,0801878	01_2019
9,8	31,7913121	01_2019	9,5	32,0958005	01_2019
9,4	31,8372162	01_2019	9,6	32,114627	01_2019
9,6	31,8814042	01_2019	9,5	32,1513508	01_2019
9,7	31,9293856	01_2019	9,9	32,2773064	01_2019
9,7	31,9860169	01_2019	10,4	32,3837735	01_2019
11,1	32,1998827	01_2019	10,5	32,5147439	01_2019



10,6	31,7677672	01_2019	9,7	32,6672176	01_2019
10,1	31,8818099	01_2019	10,7	32,8377	01_2019
10	31,9168375	01_2019	11,5	33,0226918	01_2019
9,7	31,9506059	01_2019	11,9	33,2189791	01_2019
9,7	31,9894159	01_2019	11,8	33,6345481	01_2019
9,7	32,0386587	01_2019	11,1	33,8492652	01_2019
10,7	32,2351778	01_2019	9,9	32,0689591	01_2019
11	32,3322238	01_2019	9	32,0841573	01_2019
10,8	32,4476283	01_2019	9,4	32,0888377	01_2019
10,4	31,8716065	01_2019	9,8	32,0947039	01_2019
10,3	31,9560397	01_2019	10	32,1288467	01_2019
9,9	31,9803313	01_2019	10,4	32,1812545	01_2019
9,8	32,0042529	01_2019	10,6	32,2782403	01_2019
9,7	32,0348542	01_2019	10,4	32,3910616	01_2019
9,7	32,0779612	01_2019	10	32,5288343	01_2019
9,6	32,3857593	01_2019	10	32,6879922	01_2019
10,5	32,4992404	01_2019	9,4	32,8646215	01_2019
11	32,6318044	01_2019	9,6	33,0549624	01_2019
11	32,781666	01_2019	10,3	33,2556694	01_2019
10,8	32,0062878	01_2019	11,3	33,4638919	01_2019
10,9	32,0274279	01_2019	12	33,677225	01_2019
10,9	32,0809679	01_2019	12	33,8936226	01_2019
10,9	32,1069177	01_2019	11,6	32,0536986	01_2019
10,4	32,1456652	01_2019	10,4	32,0788438	01_2019
9,8	32,2905967	01_2019	8,9	32,0887642	01_2019
9,9	32,3868804	01_2019	9,4	32,0895844	01_2019
10,5	32,5050843	01_2019	10,1	32,1009155	01_2019
11,2	32,6435791	01_2019	10,1	32,132629	01_2019
11,4	32,7999822	01_2019	10,6	32,1900359	01_2019
11,1	32,0492232	01_2019	10,9	32,2754587	01_2019
10,7	32,0616041	01_2019	11	32,4627105	01_2019
10,3	32,0929944	01_2019	10,7	32,62165	01_2019
10,1	32,11413	01_2019	10,2	32,8009584	01_2019
10	32,1506799	01_2019	10,4	32,9958192	01_2019

Anexo 10. Muestra de cien primeros datos de O₃.

Sentinel 5P	AIRS	MERRA-2	Fecha	Sentinel 5P	AIRS	MERRA-2	Fecha
112684,3	110456,635	110923,008	01_2019	112469,2	110393,212	110918,155	01_2019
112678,5	110455,708	110922,729	01_2019	112459,9	110393,246	110916,152	01_2019
112766,8	110454,795	110920,636	01_2019	112499,7	110393,321	110914,597	01_2019
112747,2	110447,733	110922,368	01_2019	112500,5	110393,416	110913,507	01_2019
112728,9	110446,915	110920,309	01_2019	112713,4	110393,539	110912,887	01_2019
112897,4	110446,118	110918,68	01_2019	112744,9	110393,682	110912,75	01_2019
112818,7	110445,341	110917,481	01_2019	112747,4	110393,819	110913,098	01_2019
112768,1	110438,784	110921,918	01_2019	112787,7	110393,962	110913,916	01_2019
112839,2	110438,082	110919,887	01_2019	112696,4	110394,091	110915,197	01_2019
113038,5	110437,407	110918,292	01_2019	112544,1	110384,038	110916,929	01_2019
112914,7	110436,76	110917,147	01_2019	112458,9	110384,038	110919,082	01_2019
112814,6	110436,119	110916,451	01_2019	112425	110384,106	110914,884	01_2019
112775	110429,794	110921,373	01_2019	112381,1	110384,235	110917,072	01_2019
112788,2	110429,207	110919,362	01_2019	112388,2	110384,419	110915,041	01_2019
112819,7	110428,655	110917,794	01_2019	112403,9	110384,644	110913,466	01_2019
112856,6	110428,137	110916,683	01_2019	112410	110384,903	110912,348	01_2019
113002,1	110427,633	110916,036	01_2019	112717,1	110385,189	110911,701	01_2019
112983,7	110427,149	110915,858	01_2019	112740,3	110385,489	110911,523	01_2019
112877	110426,672	110916,145	01_2019	112752	110385,796	110911,823	01_2019
112786,4	110420,749	110920,732	01_2019	112671,2	110386,103	110912,6	01_2019
112767,7	110420,285	110918,735	01_2019	112571,3	110386,396	110913,827	01_2019
112588,8	110419,863	110917,188	01_2019	112491,5	110386,675	110915,504	01_2019
112820,3	110419,474	110916,097	01_2019	112430,1	110386,934	110917,59	01_2019
112850,3	110419,106	110915,484	01_2019	112391,8	110387,153	110920,057	01_2019
112909,2	110418,765	110915,34	01_2019	112377	110374,529	110922,852	01_2019
112980,9	110418,431	110915,674	01_2019	112327	110374,577	110925,919	01_2019
112879,6	110418,104	110916,479	01_2019	112354,6	110374,72	110916,172	01_2019
112746,7	110417,777	110917,753	01_2019	112390,7	110374,931	110913,432	01_2019
112747,6	110411,649	110922,409	01_2019	112398,4	110375,218	110911,121	01_2019
112748,9	110411,315	110919,982	01_2019	112390,9	110375,552	110909,267	01_2019
112683	110411,029	110917,992	01_2019	112298,5	110375,933	110912,198	01_2019
112687,6	110410,77	110916,451	01_2019	112248,3	110376,356	110911,04	01_2019
112810,7	110410,552	110915,375	01_2019	112950,8	110376,806	110910,337	01_2019
112797,9	110410,347	110914,775	01_2019	112914,4	110377,269	110910,113	01_2019



112837,8	110410,163	110914,652	01_2019	112788	110377,746	110910,351	01_2019
112953,2	110409,986	110915,013	01_2019	112574,2	110378,224	110911,046	01_2019
112867,5	110409,816	110915,852	01_2019	112480,2	110378,687	110912,198	01_2019
112706,1	110402,502	110917,153	01_2019	112434,6	110379,137	110913,786	01_2019
112672,9	110402,298	110921,557	01_2019	112405	110379,559	110915,777	01_2019
112680,5	110402,141	110919,123	01_2019	112356,5	110379,955	110918,142	01_2019
112580,9	110402,032	110917,126	01_2019	112332,6	110380,302	110920,821	01_2019
112566,4	110401,95	110915,593	01_2019	112352,2	110364,782	110923,765	01_2019
112758,2	110401,902	110914,516	01_2019	112326	110364,871	110917,808	01_2019
112762,5	110401,868	110913,916	01_2019	112333,3	110365,062	110914,625	01_2019
112791,6	110401,848	110913,793	01_2019	112397,1	110365,341	110911,857	01_2019
112907,9	110401,827	110914,154	01_2019	112409,5	110365,709	110909,513	01_2019
112831,3	110401,807	110915	01_2019	112422,4	110366,145	110907,618	01_2019
112643	110393,43	110916,301	01_2019	112390,1	110366,643	110906,173	01_2019
112564,3	110393,301	110918,06	01_2019	112422,6	110367,188	110905,191	01_2019
112539,9	110393,226	110920,602	01_2019	112438,2	110367,775	110908,811	01_2019

Anexo 11. Muestra de cien primeros datos de SO₂.

Sentinel 5P	MERRA-2	Fecha	Sentinel 5P	MERRA-2	Fecha
68,8	56,25	01_2019	50,5	57,8125	01_2019
97,2	57,8125	01_2019	50,9	59,375	01_2019
96,4	56,25	01_2019	14,8	59,375	01_2019
120,8	56,25	01_2019	5,4	59,375	01_2019
109,3	57,8125	01_2019	37,3	60,9375	01_2019
98,4	57,8125	01_2019	56,9	60,9375	01_2019
134	56,25	01_2019	64,3	60,9375	01_2019
130,1	56,25	01_2019	6,3	62,5	01_2019
117,3	57,8125	01_2019	35,7	54,6875	01_2019
100,1	57,8125	01_2019	63,5	56,25	01_2019
141,2	57,8125	01_2019	72,1	56,25	01_2019
134,8	56,25	01_2019	55,9	56,25	01_2019
129,3	57,8125	01_2019	31,1	57,8125	01_2019
87	57,8125	01_2019	28	59,375	01_2019
57,5	57,8125	01_2019	25,3	59,375	01_2019
47,7	57,8125	01_2019	13,6	59,375	01_2019
16,9	59,375	01_2019	19,2	60,9375	01_2019
143,4	59,375	01_2019	49	60,9375	01_2019
137,1	56,25	01_2019	62,9	60,9375	01_2019
132,6	57,8125	01_2019	50,7	62,5	01_2019
104,6	57,8125	01_2019	4,9	62,5	01_2019
73,9	57,8125	01_2019	15	62,5	01_2019
53,7	57,8125	01_2019	52,7	64,0625	01_2019
10,5	59,375	01_2019	75,6	64,0625	01_2019
11,9	59,375	01_2019	69,9	54,6875	01_2019
50,4	59,375	01_2019	79,2	54,6875	01_2019
129	60,9375	01_2019	51,8	56,25	01_2019
133,7	56,25	01_2019	48,1	56,25	01_2019
132,8	57,8125	01_2019	20,1	56,25	01_2019
133,7	57,8125	01_2019	10,3	57,8125	01_2019
102,1	57,8125	01_2019	7,3	57,8125	01_2019
53,8	57,8125	01_2019	41,8	57,8125	01_2019
28,9	59,375	01_2019	61,8	59,375	01_2019
49,2	59,375	01_2019	62,9	59,375	01_2019



56,7	59,375	01_2019	51,4	60,9375	01_2019
54,8	60,9375	01_2019	32,4	60,9375	01_2019
95,5	56,25	01_2019	25,3	62,5	01_2019
120,4	57,8125	01_2019	13,9	62,5	01_2019
103,2	57,8125	01_2019	2,2	62,5	01_2019
70,9	57,8125	01_2019	8,5	64,0625	01_2019
67,1	59,375	01_2019	36,3	64,0625	01_2019
41,8	59,375	01_2019	64,9	54,6875	01_2019
9	59,375	01_2019	70	54,6875	01_2019
0,5	59,375	01_2019	89	54,6875	01_2019
44,4	60,9375	01_2019	58	56,25	01_2019
17	60,9375	01_2019	51,7	56,25	01_2019
41,8	54,6875	01_2019	16,1	56,25	01_2019
52,2	56,25	01_2019	1,1	57,8125	01_2019
74,8	56,25	01_2019	8,4	57,8125	01_2019
66,7	57,8125	01_2019	41,1	57,8125	01_2019



Anexo 12. Muestra de cien primeros datos de CO.

Sentinel 5P	MERRA-2	Fecha	Sentinel 5P	MERRA-2	Fecha
29602	22238,7244	01_2019	30472,4	22174,461	01_2019
29719,6	22231,5841	01_2019	30408,8	22110,1975	01_2019
29476,8	22235,1543	01_2019	30057,7	22110,1975	01_2019
29646,9	22228,0139	01_2019	30030,4	22224,4437	01_2019
29682,5	22220,8735	01_2019	29390,2	22217,3033	01_2019
29620,6	22235,1543	01_2019	29533,4	22210,1629	01_2019
29666,1	22228,0139	01_2019	29886,8	22199,4523	01_2019
29739,9	22220,8735	01_2019	29948,3	22192,312	01_2019
29818,2	22213,7331	01_2019	30115,4	22185,1716	01_2019
29732,5	22231,5841	01_2019	30212,9	22181,6014	01_2019
29691,7	22224,4437	01_2019	30305,7	22174,461	01_2019
29643,7	22217,3033	01_2019	30379,8	22170,8908	01_2019
29884	22210,1629	01_2019	30424	22167,3206	01_2019
30093,9	22206,5927	01_2019	30407	22106,6274	01_2019
30315,5	22199,4523	01_2019	30356,4	22106,6274	01_2019
30460,9	22231,5841	01_2019	30178	22110,1975	01_2019
29732,4	22220,8735	01_2019	30152,5	22231,5841	01_2019
29712,1	22213,7331	01_2019	30115,5	22220,8735	01_2019
29847,6	22210,1629	01_2019	29374,6	22210,1629	01_2019
30052	22203,0225	01_2019	29460,4	22199,4523	01_2019
30182,6	22199,4523	01_2019	29765,3	22192,312	01_2019
30426,8	22195,8821	01_2019	29738,4	22185,1716	01_2019
30569,2	22192,312	01_2019	29760,5	22181,6014	01_2019
30555,9	22188,7418	01_2019	29892,7	22174,461	01_2019
30536	22228,0139	01_2019	30043,4	22170,8908	01_2019
29859,8	22220,8735	01_2019	30214,7	22167,3206	01_2019
29724,9	22213,7331	01_2019	30376,2	22163,7504	01_2019
29809,9	22206,5927	01_2019	30407,9	22099,487	01_2019
29844,5	22199,4523	01_2019	30372,5	22099,487	01_2019
30166,4	22195,8821	01_2019	30227,7	22099,487	01_2019
30393,4	22192,312	01_2019	30192,8	22099,487	01_2019
30506,3	22188,7418	01_2019	30206,8	22103,0572	01_2019
30515,5	22181,6014	01_2019	30086,7	22235,1543	01_2019
30522,7	22231,5841	01_2019	29767,7	22224,4437	01_2019



29829,8	22224,4437	01_2019	29563,1	22213,7331	01_2019
29801	22217,3033	01_2019	29624,8	22203,0225	01_2019
29900,7	22210,1629	01_2019	29644,9	22195,8821	01_2019
30054,5	22203,0225	01_2019	29703,6	22188,7418	01_2019
30219,7	22195,8821	01_2019	29532,9	22181,6014	01_2019
30449,6	22192,312	01_2019	29410,5	22174,461	01_2019
30594	22185,1716	01_2019	29531,7	22170,8908	01_2019
30597,9	22181,6014	01_2019	29756,7	22163,7504	01_2019
30467,8	22178,0312	01_2019	30025,7	22160,1802	01_2019
30450	22228,0139	01_2019	30300,3	22160,1802	01_2019
29816,9	22220,8735	01_2019	30389,6	22092,3466	01_2019
29963,6	22213,7331	01_2019	30349,8	22092,3466	01_2019
30009,2	22206,5927	01_2019	30155	22092,3466	01_2019
30161,4	22199,4523	01_2019	30114,6	22092,3466	01_2019
30282,2	22188,7418	01_2019	30509,6	22178,0312	01_2019
30429,2	22185,1716	01_2019	30517,2	22174,461	01_2019