



! POSGRADOS !

MAESTRÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES MENCIÓN EN REMEDIACIÓN Y RESTAURACIÓN

RPC-SO-17-NO.363-2020

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

PROYECTO DE TITULACIÓN CON COMPONENTES
DE INVESTIGACIÓN APLICADA Y/O DE
DESARROLLO

TEMA:

VARIACIÓN TEMPORAL EN LAS
CONCENTRACIONES DE CONTAMINANTES
ATMOSFÉRICOS EN ECUADOR: UN ESTUDIO
COMPARATIVO PRE, DURANTE Y POST
PANDEMIA A TRAVÉS DE LA UTILIZACIÓN DE
DATOS DEL SATÉLITE SENTINEL-5P TROPOMI

AUTOR:

DARWIN ISRAEL MUÑOZ CHAMBA

DIRECTOR:

CÉSAR IVÁN ÁLVAREZ MENDOZA

CUENCA – ECUADOR

2024

Autor:**Darwin Israel Muñoz Chamba**

Ingeniero Forestal.

Candidato a Magíster en Recursos Naturales Renovables con Mención en Remediación y Restauración por la Universidad Politécnica - Salesiana sede Cuenca.

darwinisrael@hotmail.es

Dirigido por:**César Iván Álvarez Mendoza**

Ingeniero Ambiental.

Doctor en Ciencias de la Información Geográfica y Cartográfica.

calvarezm@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2024 © Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

DARWIN ISRAEL MUÑOZ CHAMBA

Variación temporal en las concentraciones de contaminantes atmosféricos en Ecuador: un estudio comparativo pre, durante y post pandemia a través de la utilización de datos del satélite Sentinel-5p Tropomi

DEDICATORIA

Para todo aquel que haya sido testigo de la decepcionante actitud y comportamiento de todas las personas que lamentablemente tienen el poder de decidir nuestros futuros y que tratan a los estudiantes como lo más bajo del sistema educativo, con burlas, reproches, trabas y malas calificaciones a manera de revancha; sin siquiera valorar la importancia de la investigación, ni los nuevos aportes a la ciencia. Aquellos que soplan contra el viento, que solo piensan en engrandecer su ego, aplastando a los demás, al futuro de nuestra nación. Para todos aquellos estudiantes que sientan que no tiene sentido continuar luchando y estudiando, a ustedes les digo, nuestra mejor arma es el conocimiento y la humildad. Extiendan la mano a quien lo necesite, no escalen la vida pisoteando a los demás.

Esta tesis está dedicada a mi familia, cuyo apoyo incondicional ha sido el motor que me impulsó a lo largo de este desafiante pero gratificante camino académico. Gracias por estar siempre a mi lado, por comprender mis sacrificios y por celebrar mis logros. Su amor y aliento han sido fundamentales para alcanzar este hito en mi vida.

También va dedicada a mí, como un recordatorio constante de mi esfuerzo, perseverancia y dedicación en la búsqueda del conocimiento y crecimiento personal.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible esta tesis.

Al doctor César Iván Álvarez Mendoza por su cooperación.

A mi familia, por su apoyo y cariño en todas las etapas de mi vida. A mis queridos amigos que me motivaron a seguir adelante. Y finalmente a mí, por mi perseverancia y disciplina para poder finalizar este reto.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	9
Abstract	10
1. Introducción	11
2. Determinación del Problema.....	13
3. Marco teórico referencial.....	17
3.1 Contaminantes atmosféricos.....	17
3.1.1 Definición y clasificación de contaminantes atmosféricos	17
3.1.2 Fuentes de contaminación atmosférica	21
3.1.3 Efectos de los contaminantes en la salud humana	23
3.1.4 Efectos de los contaminantes en las plantas.....	26
3.2 Teledetección	27
3.2.1 Tecnología Sentinel-5P TROPOMI	28
3.3 Sistemas de información geográfica (SIG).....	29
3.3.1 Subsistemas de los SIG	30
3.3.2 Elementos de los SIG	30
3.3.3 Google Earth Engine (GEE)	31
4. Materiales y metodología.....	32
4.1. Zona de estudio.	32
4.2. Descarga de datos satelitales Sentinel 5P	32
4.3. Procesamiento de datos satelitales.....	33
4.4. Análisis espacio-temporal de los niveles de concentración de los contaminantes de monóxido de carbono (CO), Dióxido de Nitrógeno (NO ₂), Dióxido de azufre (SO ₂) y Metano (CH ₄) durante los años 2018 - 2023 a través de imágenes satelitales del Satélite Sentinel-5P TROPOMI.....	35
4.5. Establecer una proyección mediante un modelo matemático de los puntos críticos de contaminación de aire en el Ecuador para establecer medidas de gestión ambiental.....	35
5. Resultados y discusión.....	39
5.1. Realizar un análisis espacio-temporal de los niveles de concentración de monóxido de carbono (CO), Dióxido de Nitrógeno (NO ₂), Dióxido de azufre (SO ₂) y Metano (CH ₄) durante los años 2018 - 2023 a través de imágenes satelitales del Satélite Sentinel-5P TROPOMI.....	39

5.2. Comparar mediante un análisis geoespacial y estadístico la concentración de monóxido de carbono (CO), Dióxido de Nitrógeno (NO ₂), Dióxido de azufre (SO ₂) y metano (CH ₄) en los periodos prepandemia, durante y postpandemia en las principales ciudades del Ecuador.....	48
5.3. Establecer una proyección mediante un modelo matemático de los puntos críticos de contaminación de aire en el Ecuador para establecer medidas de gestión ambiental.....	56
6. Conclusiones.....	63
Referencias	66
Anexos	70

VARIACIÓN TEMPORAL
EN LAS
CONCENTRACIONES
DE CONTAMINANTES
ATMOSFÉRICOS EN
ECUADOR: UN
ESTUDIO
COMPARATIVO PRE,
DURANTE Y POST
PANDEMIA A TRAVÉS
DE LA UTILIZACIÓN DE
DATOS DEL SATÉLITE

SENTINEL-5P TROPOMI

AUTOR:

«DARWIN ISRAEL MUÑOZ CHAMBA»»

RESUMEN

En este estudio se analizaron las concentraciones de CO, NO₂, SO₂ y CH₄ a nivel nacional y a nivel provincial, en las provincias de Azuay, Guayas y Pichincha durante los periodos prepandemia, pandemia y postpandemia, se utilizó información del satélite SENTINEL-5P TROPOMI, obtenida y procesada mediante código en la plataforma Google Earth Engine (GEE). A nivel nacional, se encontró que las concentraciones tienden a aumentar con el tiempo. Sin embargo, al comparar los meses de marzo, abril y mayo de 2019 con los mismos meses de 2020, se observó una disminución en las concentraciones de CO, SO₂ y NO₂ durante la pandemia, seguida de un aumento en las concentraciones tras el levantamiento de las restricciones. Debido a la poca disponibilidad de datos en los meses de pandemia no se logró hacer el mismo análisis para el CH₄. Los valores mínimos alcanzados fueron de 2.33×10^{-5} mol/m² para el SO₂ en mayo de 2020, de 3.33×10^{-5} mol/m² para el NO₂ en marzo de 2020, de 0.029 mol/m² para el CO en mayo de 2020. Sin embargo, si se analiza los datos con un enfoque anual considerando todos los meses de 2019 y 2020, de los contaminantes analizados, el único que presenta disminución en las concentraciones es el NO₂. Las proyecciones realizadas muestran una clara tendencia de aumento en todos los contaminantes analizados para los primeros 6 meses de 2024. Si bien este es un estudio pionero referente a realizar proyecciones de las concentraciones, es necesario que se genere más investigación en esta temática, para poder generar información base con la que se pueda desarrollar modelos más robustos y precisos para la proyección de concentraciones en el futuro.

Palabras clave:

TROPOMI, SIG, Teledetección

ABSTRACT

In this study, the concentrations of CO, NO₂, SO₂, and CH₄ in Ecuador and the provinces of Azuay, Guayas, and Pichincha were analyzed for the pre-pandemic, pandemic, and post-pandemic periods using data from the SENTINEL-5P TROPOMI satellite, obtained and processed with code on the Google Earth Engine (GEE) platform. Nationally, the concentrations show a tendency to increase over the years. However, when comparing the months of March, April, and May of 2019 with the same months in 2020, a decrease in the concentrations of CO, SO₂, and NO₂ was observed during the pandemic, followed by a considerable increase after the restrictions were lifted. The same analysis could not be performed for CH₄ due to the limited availability of data during the pandemic months. The minimum values recorded were 2.33×10^{-5} Mol/m² for SO₂ in May 2020, 3.33×10^{-5} Mol/m² for NO₂ in March 2020, and 0.029 Mol/m² for CO in May 2020. However, when analyzing the data on an annual basis, considering all the months of 2019 and 2020, the only contaminant that shows a decrease in concentrations is NO₂. The projections made show a clear increasing trend in all pollutants for the first 6 months of 2024. While this is a pioneering study regarding conducting projections of concentrations, it is necessary to generate more research in this area to develop foundational information that can be used to build more robust and accurate models for projecting concentrations in the future.

Palabras clave:

TROPOMI, GIS, Remote Sensing

.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire se define como cualquier condición atmosférica en la que ciertas sustancias están presentes en concentraciones que pueden producir efectos indeseables en las personas y su ambiente. Estas sustancias incluyen gases como SO_x, NO_x, CO, HCs, etc.; material particulado como humo, polvo, vapores, aerosoles; y material radioactivo (Admassu y Wubeshet, 2014).

Estos contaminantes son comunes en zonas urbanas por la fuerte presencia de actividades antrópicas como la industria y el transporte. Los contaminantes derivados de estas actividades antrópicas representan un riesgo a la salud de las personas en la ciudad, por esta razón es necesario el estudio constante de las concentraciones y variaciones de dichos contaminantes en el aire.

Pocos estudios abordan esta problemática, se puede destacar el estudio realizado por Álvarez (2014), en donde estimó la contaminación del aire por PM₁₀ en Quito utilizando imágenes satelitales, determinó que el modelo que mejor se ajusta para estimar contaminación del aire por PM₁₀ (tomando en cuenta las mediciones insitu), es el modelo "Landsat ETM + PM₁₀", que fue el modelo que representó mejor la realidad de las mediciones realizadas insitu por la secretaria del ambiente de Quito. En sus conclusiones el autor menciona que entre el año 2008 y 2011 la concentración de PM₁₀ en la ciudad se mantuvo en un nivel "Aceptable", contemplando los máximos permisibles establecidos en el TULSMA.

No obstante, estos datos tienen más de una década de antigüedad, en donde la población en la provincia era aproximadamente de 2 576 287 personas (INEC, 2010), por lo que es necesario un estudio con datos actuales ya que la población para el año 2021 se proyectaba a 2 827 106 personas (Quito como vamos, 2022), lo que también se traduce en aumento del parque automotor, producción energética y alimentaria; y su consecuente impacto en la calidad del aire.

Debido a esta problemática, Álvarez-Mendoza et al. (2019) llevaron a cabo una investigación en donde lograron establecer un modelo de predicción de O₃ a partir de varias variables de entrada, implementando una variante del modelo LUR (Land Use Regression). Las variables seleccionadas fueron mediciones de contaminación del aire, datos meteorológicos y datos de teledetección derivados del satélite Landsat 8 desde el 2014. El modelo de predicción final incluye 10 variables independientes y presenta un coeficiente de determinación (R²) de 0.768, este modelo ayuda a entender las concentraciones de ozono en Quito.

Guerrero García (2021), realizó un análisis de la variación en la calidad de aire debido al confinamiento por COVID-19 en el Ecuador continental, en donde encontró que gases como el dióxido de nitrógeno (NO₂) y dióxido de azufre (SO₂) tuvieron una disminución significativa durante el confinamiento por COVID-19, según la autora, estas disminuciones en las concentraciones de gases nocivos son debido principalmente a las restricciones vehiculares y al cese de actividades industriales., la autora recomienda realizar investigaciones en donde se contemplen otros gases implicados en la contaminación atmosférica como es el caso del monóxido de carbono (CO) (Guerrero García, 2021).

La investigación realizada por Álvarez-Mendoza (2023), resalta la importancia de la aplicación de sensores remotos en la contaminación del aire como una medida para el control de los contaminantes y su relación con la salud pública.

El autor analiza a los sensores remotos y a los modelos LUR (Land use regression) como una alternativa confiable para realizar modelaciones de contaminantes del aire, estos modelos aplican variables geográficas tales como uso de suelo y cobertura de suelo, condiciones térmicas de superficie e índices ambientales que son obtenidos con sensores remotos. Estas modelaciones son muy útiles en el campo de la salud pública, ya que se pueden hacer predicciones o identificar posibles hábitats de vectores (Alvarez-Mendoza, 2023).

2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

Es la causa principal de aproximadamente 7 millones de muertes prematuras cada año. Los contaminantes con mayor evidencia de efectos adversos para la salud incluyen material particulado como el PM2.5 y PM10, ozono (O₃), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de sulfuro (SO₂) dióxido y monóxido de carbono (CO₂, CO) (WHO, 2022).

En Ecuador la contaminación del aire se da en las grandes ciudades, Quito, Guayaquil y Cuenca, que se caracterizan por su gran población urbana y la presencia de industrias. La mayor proporción de contaminación proviene del parque vehicular (FLACSO, MAE y PNUMA, 2008).

En Quito, la principal fuente de contaminación es el tráfico vehicular y la combustión. Los autobuses y otros vehículos a diésel a menudo viejos y sin mantenimiento, son los principales contribuyentes a la contaminación del aire (UNICEF, 2019). Estudios sugieren que existe una correlación positiva entre los registros de los niveles de dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre con el uso de automóviles durante las horas laborales, esto indica un vínculo entre el tráfico y la contaminación (Vinueza, 2018).

Según el Ministerio de Salud Pública, alrededor de 1771 personas mueren cada año debido a la contaminación del aire, de las cuales 86 son niños (Ministerio de Salud Pública, 2016). En el año 2000 se realizó un estudio sobre el aumento de enfermedades respiratorias en niños de Quito por contaminación atmosférica derivada de los vehículos, en este estudio se determinó que los niños que estudiaban en un sector urbano central presentan un promedio de carboxihemoglobina (COHb) superior al máximo normal, en este estudio concluyen que los niños que tienen más exposición a la contaminación atmosférica, tienen cuatro veces mayor riesgo de presentar infecciones respiratorias frente a los niños del sector urbano periférico y rural (Fundación Natura, 2000).

Esto evidencia el grave problema ambiental y social que enfrenta la ciudad. Dado que el estudio se realizó en el año 2000, es razonable asumir que la situación actual se ha agravado debido a dos factores cruciales: el crecimiento demográfico y la consecuente ampliación del parque automotor.

Sin embargo, se debe considerar que el monitoreo ambiental requiere de elevados costes de inversión para la compra, operación, implementación y mantenimiento de equipos adecuados para las mediciones, por lo que su adquisición no es considerada como una prioridad. De esto se deriva la necesidad de encontrar alternativas a la medición tradicional.

La estimación precisa de la contaminación del aire es de crucial importancia para la salud pública y el bienestar de la población. La exposición a contaminantes atmosféricos, como el material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀), ozono (O₃), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de sulfuro (SO₂) dióxido y monóxido de carbono (CO₂, CO), puede tener efectos perjudiciales en la salud humana, incluyendo problemas respiratorios, enfermedades cardiovasculares y el agravamiento de afecciones preexistentes. Además, la contaminación del aire también contribuye al cambio climático y afecta el ambiente en general.

En este contexto, la utilización de nuevas tecnologías, como los sensores remotos, se presenta como una valiosa alternativa para monitorear y estimar la concentración de contaminantes en el aire. Estos sensores ofrecen la posibilidad de obtener mediciones en amplias áreas geográficas, brindando una visión panorámica y detallada de la distribución espacial de los contaminantes. Además, su capacidad para realizar mediciones continuas y en tiempo real permite obtener datos actualizados de forma constante, lo que facilita una vigilancia efectiva y la detección temprana de cambios en la calidad del aire.

La teledetección, a través de imágenes satelitales, también se destaca por su bajo costo de implementación en comparación con los métodos tradicionales de monitoreo del aire. Esto permite una cobertura más amplia y accesible para áreas

que pueden ser difíciles de alcanzar o que carecen de una infraestructura adecuada para la instalación de estaciones de monitoreo en tierra.

Esta investigación busca determinar los niveles de concentración de los contaminantes en las diferentes provincias de Ecuador haciendo una comparación pre, durante y postpandemia para realizar proyecciones que permitan conocer las futuras concentraciones; este estudio, alineándose con lo mencionado, se realizará con imágenes satelitales del satélite Sentinel-5P equipado con el sensor TROPOMI, que es un equipo especializado para determinar concentraciones de contaminantes en el aire, además de que los datos generados por el TROPOMI son de libre acceso, por lo que esta investigación pretende contribuir a encontrar alternativas más accesibles para medir.

OBJETIVOS

Objetivo General:

Evaluar los niveles de concentración de CO, NO₂, SO₂ y CH₄ presente en el aire de Ecuador mediante la utilización de imágenes satelitales del Satélite Sentinel-5P TROPOMI.

Objetivos específicos:

1. Realizar un análisis espaciotemporal de los niveles de concentración de monóxido de carbono (CO), Dióxido de Nitrógeno (NO₂), Dióxido de azufre (SO₂) y Metano (CH₄) durante los años 2018 - 2023 a través de imágenes satelitales del Satélite Sentinel-5P TROPOMI.
2. Comparar mediante un análisis geoespacial y estadístico la concentración de monóxido de carbono (CO), Dióxido de Nitrógeno (NO₂), Dióxido de azufre (SO₂) y metano (CH₄) en los periodos prepandemia, durante y postpandemia en las principales ciudades del Ecuador.

3. Establecer una proyección mediante un modelo matemático de los puntos críticos de contaminación de aire en el Ecuador para establecer medidas de gestión ambiental.

3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1 CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

3.1.1 DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

La atmósfera se puede definir como el envoltorio gaseoso relativamente delgado que rodea todo el planeta Tierra. Posee varias propiedades relacionadas con su estado físico y composición química, y experimenta una variedad de procesos internos e interacciones externas que pueden mantener o alterar estas propiedades (Singh, 1995). La atmósfera está constituida por: Nitrógeno (N) en un 78%, oxígeno (O) en un 21%, el restante 1% corresponde al hidrógeno (H), argón (Ar), neón (Ne), helio (He) y dióxido de carbono (CO₂) (Ackerman y Knox, 2007).

La contaminación atmosférica se puede definir como una mezcla de sustancias peligrosas tanto producidas por el ser humano, como natural que son liberadas al aire. Algunas sustancias peligrosas son liberadas de forma natural, como las cenizas y los gases de las erupciones volcánicas, otras emisiones pueden ser causadas tanto por la actividad humana como por la natural, como el humo de los incendios forestales; y el metano, que proviene de la descomposición de la materia orgánica en los suelos y en los corrales de alimentación de los animales (Rice et al., 2021).

La contaminación del aire es causada por sólidos, líquidos y ciertos gases que están suspendidos en el aire, las principales fuentes de contaminación del aire provocadas por el humano son los gases de escape de los vehículos, plantas de manufactura, polvo, volcanes e incendios. Las partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire son llamadas aerosoles (Sarla, 2020).

La clasificación estándar de los contaminantes puede ser de dos tipos:

Contaminantes primarios

Los contaminantes primarios son aquellos que se emiten directamente de una fuente específica. Ejemplos de estos incluyen los óxidos de nitrógeno (NOx), los óxidos de azufre (SOx), los compuestos orgánicos volátiles (COV), la materia particulada (PM) y los óxidos de carbono (CO₂ + CO) (Onursal y Gautam, 1984).

Radón (Rn)

Es un gas radioactivo responsable de ser las principales fuentes de radiación ionizante para la población general. Entre las fuentes de radiación ionizante de origen natural, el gas radón es con mucho la más importante. El isótopo ²²²Rn es el más abundante del radón y es un gas noble que se forma a partir del radio (²²⁶Ra) y este a su vez es un subproducto de la desintegración del uranio (²³⁸U). El uranio y el radio están presentes de manera natural en rocas y suelos y por esta razón es común que este gas se concentre en espacios cerrados como minas subterráneas y casas o edificios residenciales (OMS, 2009).

Estudios en Europa, Norteamérica y Asia sobre el radón en interiores demostraron que la proporción de los casos de cáncer de pulmón atribuible a este gas varían entre un 3% y un 14% dependiendo de la concentración media de cada país y los métodos de cálculo empleados, convirtiéndose así en la segunda causa de cáncer de pulmón después del tabaco (OMS, 2009).

Monóxido de carbono (CO).

Es un gas incoloro, inodoro y ligeramente más denso que el aire, es emitido por fuentes naturales como antropogénicas. Las fuentes antropogénicas generan CO a partir de la combustión incompleta de combustibles carbonáceos en vehículos automotores, sistemas de calefacción, instalaciones industriales, plantas de generación de energía térmica e incineradores, entre otros. Los vehículos automotores son la principal fuente de emisión de CO (Onursal y Gautam, 1984).

Las emisiones procedentes de los vehículos con motores de encendido por chispa son emitidas por el escape, el cárter y el sistema de combustible. Los mayores contaminantes emitidos por los vehículos de gasolina son CO, HC, NO_x y plomo (Onursal y Gautam, 1984).

Dióxido de Nitrógeno (NO₂)

Este grupo incluye al óxido nítrico (NO), el bióxido de nitrógeno (NO₂), óxido nitroso (N₂O) el trióxido de nitrógeno (N₂O₃) y el pentóxido de nitrógeno (N₂O₅). Estos óxidos son producidos por fenómenos naturales como los relámpagos, erupciones volcánicas y la acción bacteriana del suelo, y también por fuentes antropogénicas como los combustibles en motores de combustión interna, plantas generadoras de energía térmica, instalaciones industriales, sistemas de calefacción y los incineradores. El NO y NO₂, representados colectivamente como NO_x son los principales óxidos de nitrógeno emitidos por los vehículos (Onursal y Gautam, 1984).

Dióxido de Azufre (SO₂)

El bióxido de azufre (SO₂) es un gas estable, no inflamable, no explosivo e incoloro. Es extremadamente soluble en agua y es producido mediante la quema de combustibles fósiles que contienen azufre en la generación de energía térmica, calefacción, cocción y transporte. En la atmósfera el SO₂ puede convertirse en trióxido de azufre SO₃ al reaccionar con el oxígeno. Se estima que las emisiones mundiales de SO₂ alcanzan los 294 millones de toneladas anuales. De los cuales, 160 millones de toneladas son de origen antropogénico (Onursal y Gautam, 1984).

Metano (CH₄)

Es uno de los principales gases de efecto invernadero, las principales fuentes de emisión de este gas son: emisión por descomposición anaeróbica en humedales naturales, campos de arroz inundados, emisión de sistemas de producción

ganadera, quema de biomasa, descomposición anaeróbica de desechos orgánicos en vertederos, emisión de metano fósil durante la exploración y transporte de combustibles fósiles. Es evidente que las actividades antrópicas juegan un papel importante en el aumento de las emisiones de metano en la mayoría de estas fuentes, especialmente la expansión de cultivos de arroz, producción ganadera y la exploración y uso de combustibles fósiles (Heilig, 1994).

Materia particulada (PM)

Consiste en sólidos finos y pequeñas gotas de líquidos con excepción del agua pura, que están dispersos en el aire. Son originadas por fuentes naturales y antropogénicas. Entre las fuentes naturales cabe mencionar el polvo arrastrado por el viento, cenizas volcánicas, incendios forestales, sal marina y polen. Son fuentes antropogénicas las plantas de generación de energía térmica, la industria, instalaciones comerciales y residenciales y los vehículos automotores que utilizan combustibles fósiles (Onursal y Gautam, 1984).

Las partículas con un diámetro aerodinámico de 10 μm o menos, son conocidas como partículas inhalables en suspensión o PM₁₀, estas se mantienen en la atmósfera durante períodos más largos debido a sus bajas velocidades de sedimentación. Pueden penetrar profundamente en las vías respiratorias. Las principales fuentes de PM₁₀ o partículas gruesas son: polvo arrastrado por el viento, vehículos que recorren caminos no pavimentados, manipulación de materiales y operaciones de trituración y molienda (Onursal y Gautam, 1984).

Contaminantes secundarios

Son aquellos que se forman a través de reacciones entre diferentes contaminantes primarios o con constituyentes naturales en la atmósfera. Ejemplos incluyen el ozono (O₃) y los Peróxidos de Alquilos Nitratos (PAN).

Ozono (O₃)

Es un gas incoloro que se encuentra en dos capas separadas de la atmósfera. El ozono que se encuentra en la estratósfera se forma por la fotólisis del oxígeno o de hidrocarburos que se encuentran naturalmente y protegen a la tierra de los rayos ultravioleta. En la tropósfera, el ozono a nivel del suelo se forma como resultado de la reacción entre los compuestos orgánicos volátiles y los NO_x con el oxígeno del aire, en presencia de luz solar y altas temperaturas. El ozono a nivel del suelo es uno de los principales componentes del smog en zonas urbanas y los vehículos automotores son la principal fuente antropogénica de emisión (Onursal y Gautam, 1984).

3.1.2 FUENTES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Fuentes Naturales de contaminación

El material particulado (PM) de proveniencia natural incluye al polvo de la superficie terrestre (material de la corteza), sal marina en áreas costeras y material biológico, en forma de polen, esporas o restos de plantas y animales (Delon, 2018). Las erupciones volcánicas pueden introducir cantidades muy importantes de gases y partículas en la atmósfera. Por ejemplo, el volcán Etna emite 3,000 toneladas de dióxido de azufre (SO₂) en un día promedio y hasta 10,000 toneladas durante períodos de gran actividad (Pénard-Morand y Annesi-Maesano, 2004).

Otras fuentes naturales de contaminación del aire incluyen: rayos, que producen cantidades significativas de óxidos de nitrógeno (NO_x); algas en la superficie de los océanos, que emiten sulfuro de hidrógeno (H₂S); erosión eólica, que introduce partículas en la atmósfera; y zonas húmedas, como pantanos, turberas o lagos poco profundos, que producen metano (CH₄). Bajas concentraciones de O₃ ocurren naturalmente a nivel del suelo, formadas en presencia de luz solar por reacciones entre NO_x y compuestos orgánicos volátiles (COV_s) (Pénard-Morand y Annesi-Maesano, 2004).

Fuentes Antrópicas

En las áreas urbanas, la mayoría de la contaminación del aire proviene de fuentes creadas por el ser humano. Estas fuentes pueden clasificarse como móviles (automóviles, camiones, aviones, motores marinos, etc.) o de origen puntual (fábricas, plantas eléctricas, etc.) (Figura 1) (Pénard-Morand y Annesi-Maesano, 2004).

El tráfico vehicular constituye la principal fuente de contaminación del aire en las grandes ciudades de los países industrializados. La combustión de combustibles carbonosos (carbón, gasolina, madera, gas natural) nunca es completa, y produce monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos. Los NO_x resultan de la combinación de nitrógeno del aire y oxígeno de la combustión de combustibles fósiles contenidos en el combustible de motor a alta temperatura (Pénard-Morand y Annesi-Maesano, 2004).

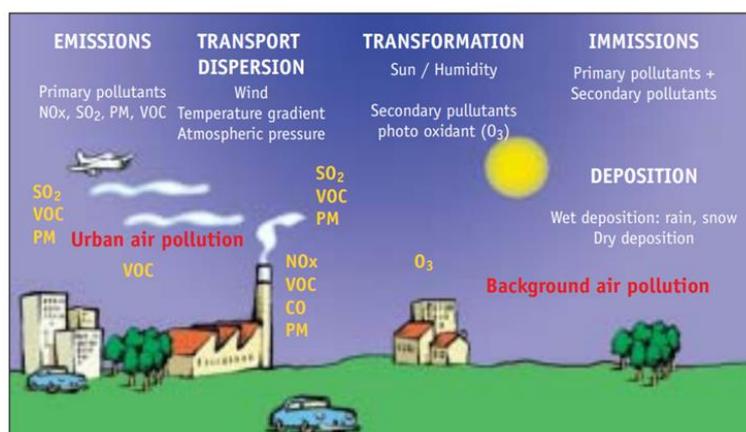


Figura 1. Fuentes de contaminación del aire (Pénard-Morand y Annesi-Maesano, 2004).

Las actividades humanas han aumentado la cantidad de COV_5 debido al petróleo, las industrias químicas y el transporte y NO_x provienen de la combustión en centrales eléctricas y automóviles. En consecuencia, el O_3 está más concentrado y se produce más *smog* en regiones densamente pobladas e industriales. Las actividades humanas contribuyen al total de PM ambiental. En entornos urbanos,

las partículas surgen principalmente como resultado de la combustión de fuentes móviles y estacionarias. El carbón y el azufre de los aceites combustibles se oxidan en SO_2 . Estos son combustibles que se utilizan para moverse, calentarse y proporcionar la energía necesaria para muchos procesos industriales. Además, la industria produce algunos contaminantes específicos como residuos, como derivados de flúor o aluminio (Pénard-Morand y Annesi-Maesano, 2004).

El tratamiento de minerales libera metales pesados como cadmio, zinc y plomo. El mercurio se produce mediante la incineración de basura doméstica. La agricultura, mediante el uso de fertilizantes nitrogenados, genera óxido nitroso (N_2O), un gas de efecto invernadero, y amoníaco (NH_3), que participan en los procesos de acidificación. CH_4 , otro gas de efecto invernadero, se produce principalmente por la digestión y evacuación de animales de granja (Pénard-Morand y Annesi-Maesano, 2004).

3.1.3 EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EN LA SALUD HUMANA

Dióxido de nitrógeno (NO_2)

Es un gas reactivo que causa bronquitis y neumonía, aumentando también la susceptibilidad a infecciones respiratorias. Afecta tanto al sistema inmunológico celular como al humoral, y perjudica las respuestas inmunitarias. Según Hasselbald et al. (1992), los niños son más propensos a enfermedades respiratorias debido a la exposición al NO_2 , y otro estudio realizado por Saldiva et al. (1994), ha asociado el NO_2 con la mortalidad diaria en niños menores de 5 años. Las personas expuestas al NO_2 tienen riesgo de desarrollar bronquitis crónica, especialmente aquellos con enfermedades respiratorias crónicas preexistentes y enfisema.

Dióxido de azufre (SO_2)

Cuando se inhala más de $10,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de SO_2 , se puede producir broncoconstricción y bronquitis química. Concentraciones de $2,600$ a $2,700 \mu\text{g}/\text{m}^3$

generan síntomas clínicos inmediatos con broncoespasmo en asmáticos. Algunos estudios epidemiológicos indican los efectos de exposiciones cortas al SO_2 , como una pequeña disminución reversible en la función pulmonar de los niños ($250\text{-}450 \mu\text{g}/\text{m}^3$); irritación en el sistema bronquial (alrededor de $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$); aumento de la mortalidad ($500\text{-}1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Sonwani y Saxena, 2021).

Concentraciones elevadas de SO_2 ($>1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$) junto con partículas en suspensión se consideran responsables de una alta tasa de mortalidad durante la niebla tóxica de Londres en 1952, con alrededor de 4,000 muertes adicionales. Se han observado numerosos estudios de series temporales de un solo y múltiples contaminantes que relacionan el SO_2 con la mortalidad y morbilidad diarias. El SO_2 también es responsable de reacciones alérgicas como la rinitis. Los síntomas de la rinitis incluyen congestión nasal y estornudos, y su exposición a largo plazo conduce a otros síntomas graves como la atopía. Una alta inhalación de SO_2 presente en el aire ambiente se ha relacionado con un aumento en la liberación de glóbulos blancos y sus precursores de la médula ósea, así como un número elevado de células de banda en la sangre periférica. También puede causar daño a los fetos en desarrollo y al sistema reproductivo, especialmente en los testículos. Puede provocar una mayor morbilidad y mortalidad, así como bajo peso al nacer. A nivel molecular, el SO_2 disminuye los niveles de inmunidad, aumenta la permeabilidad de las membranas, causa rotura de cromosomas y es mutagénico (Sonwani y Saxena, 2021).

Dosificaciones altas de SO_2 inhalado se han asociado con ciertos efectos neurotóxicos agudos, como neuritis periférica, convulsiones, agitación, temblores, vértigo y fiebre. El SO_2 líquido, cuando se encuentra en condiciones de alta presión o baja temperatura, puede causar un grave daño corneal. La córnea se vuelve gris y después de unas horas, los párpados se hinchan. Como resultado, la conjuntiva puede volverse blanca y opaca, y puede ocurrir trombosis en los vasos sanguíneos oculares. La exposición al SO_2 también puede causar daño en la piel al entrar en contacto directo con ella, produciendo reacciones dermatológicas como la urticaria. En dosis altas, el SO_2 irrita severamente la piel, causando dolor, enrojecimiento y

ampollas. El SO_2 también ha sido responsable de inhibir la síntesis de ADN y causar daño cromosómico, como se ha observado en trabajadores de fábricas de ácido sulfúrico (Sonwani y Saxena, 2021).

Dióxido de carbono (CO_2)

El valor límite umbral de la American Conference of Governmental Industrial Hygienists es de 5000 ppm para una exposición de ocho horas, con un límite de exposición en techo de 30,000 ppm por un período de 10 minutos basado en datos de inhalación aguda. A 40,000 ppm se vuelve peligroso para la vida y una exposición de 30 minutos a 50,000 ppm genera intoxicación, y niveles mayores que eso (7-10%) producen inconsciencia. Los datos de toxicidad aguda muestran que la concentración letal de CO_2 es de 90,000 ppm (9%) durante 5 minutos (NIOSH, 1976).

Los niveles normales de CO_2 se consideran inofensivos, pero concentraciones elevadas conducen a mareos, desorientación, asfixia y en casos extremos, pueden causar la muerte. La muerte ocurre cuando hay una depresión del sistema nervioso central con exposición prolongada a concentraciones altas de CO_2 y los mecanismos respiratorios del cuerpo están abrumados o fallan. Es un potencial tóxico inhalado y un asfixiante. Entra al cuerpo desde el aire a través de los pulmones y se disuelve en la sangre, causando un desequilibrio ácido-base o acidosis que afecta al sistema nervioso central. La principal causa de acidosis es el exceso de CO_2 en la sangre. Bajo condiciones fisiológicas normales, hay una concentración alta de CO_2 en la sangre en comparación con los pulmones, creando un gradiente donde el CO_2 sanguíneo difunde hacia los pulmones y es exhalado. El aumento de CO_2 inhalado y su reacción inmediata con el agua en la sangre forma ácido carbónico (H_2CO_3^-) que finalmente se transforma en iones de hidrógeno (H^+) y bicarbonato (HCO_3^-) (Farrar, Neil y Howle, 1999).

El monóxido de carbono es otro gas estable que se forma debido a la combustión incompleta de CO_2 en la atmósfera; los pulmones son la ruta más importante para las exposiciones ambientales. El CO, al combinarse con la hemoglobina, forma carboxihemoglobina (COHb). Cuando el CO llega a los pulmones, se difunde

rápidamente a través de las membranas alveolares y capilares e incluso cruza las membranas placentarias. El CO se une de manera reversible a una de las proteínas de la hemoglobina. Aproximadamente el 80-90% del CO absorbido se une a la hemoglobina, lo que provoca una reducción en la capacidad de transporte de oxígeno de la sangre. La afinidad de la hemoglobina por el CO es de 200-250 veces mayor que por el oxígeno, mientras que su afinidad relativa con otras proteínas de la hemoglobina, como el citocromo oxidasa y el citocromo P-450, es mucho menor (USEPA, 1990).

3.1.4 EFECTOS DE LOS CONTAMINANTES EN LAS PLANTAS

La contaminación del aire también puede causar daño a las plantas. Afecta la salud de las plantas al alterar su fisiología, bioquímica y morfología. Diferentes gases atmosféricos conducen a diversos síntomas visibles, lo que resulta en una reducción del crecimiento y la productividad de las plantas (Shannigrahi, Fukushuma y Sharma, 2004).

Los síntomas o efectos en la fisiología y bioquímica indican el estado del medio ambiente. En los estudios de contaminación del aire, el biomonitoreo es un concepto interesante. Existen algunas plantas que actúan como indicadores cuando están expuestas a contaminantes del aire, como consecuencia de lo cual diferentes plantas producen diferentes síntomas, especialmente morfológicos, que varían según el contaminante del aire. Por lo tanto, las plantas pueden actuar como una herramienta valiosa en los métodos para controlar los contaminantes del aire. Por lo tanto, este tipo de plantas entran en la "categoría sensible". Con fines de biomonitoreo, se utiliza el Índice de Tolerancia a la Contaminación del Aire (APTI) para demarcar las plantas en diferentes categorías como tolerantes, moderadas, sensibles y muy delicadas. Las plantas tolerantes actúan como "sumideros" y las plantas delicadas actúan como "indicadoras" (Shannigrahi, Fukushuma y Sharma, 2004).

Las plantas toman contaminantes del aire del entorno, los adsorben, acumulado o absorben en su cuerpo. Si el contaminante del aire es tóxico, puede causar lesiones

y producir síntomas especialmente morfológicos. Las especies de plantas tolerantes ayudan en la eliminación, lo que ayuda a reducir la carga total de contaminación. Los contaminantes del aire también pueden dañar las cutículas de las hojas y afectar la conductancia estomática. También pueden afectar los sistemas fotosintéticos, la tasa de respiración y los patrones de asignación de carbono dentro de las plantas. El impacto de los contaminantes del aire en la salud de las plantas se puede dividir en dos formas: directamente a través de lesiones visibles (clorosis y necrosis) o indirectamente a través del crecimiento y la reproducción (Weinstein, 1977).

3.2 TELEDETECCIÓN

Es la ciencia y arte de obtener información sobre un objeto, área o fenómeno a través del análisis de datos adquiridos por un dispositivo que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno de estudio. En muchos aspectos, la teledetección puede ser pensada como un proceso de lectura. Usando diferentes sensores, colectamos remotamente datos que serán analizados para obtener información sobre los objetos de estudio. La información colectada remotamente puede darse de diferentes formas, incluyendo variaciones en la distribución de fuerzas, distribución de ondas acústicas, o distribución de energía electromagnéticas (Lillesand, Kiefer, y Chipman, 2015).

Las imágenes satelitales son producto del uso de sensores remotos aerotransportados sobre satélites, las cuales consisten en tener imágenes de la superficie terrestre bajo ciertas características, esto depende del satélite y el sensor que se utilice (Alvarez, 2014).

Los sensores de un satélite reciben información acerca de un objeto a través de la energía electromagnética. Esta información puede estar codificada en la frecuencia, intensidad o polarización de la onda y es transmitida directamente desde el objeto o indirectamente por reflexión, dispersión o reemisión hasta el sensor. Todos los materiales de la Tierra reflejan o emiten energía electromagnética. Los sensores miden la intensidad de la radiación electromagnética emitida por un objeto y

estudian sus propiedades físicas a partir de su variación con la frecuencia (García, 2000).

3.2.1 TECNOLOGÍA SENTINEL-5P TROPOMI

Tropospheric monitoring instrument (TROPOMI) a bordo del satélite Sentinel-5 Precursor. Es la primera misión Copernicus desarrollada por la Agencia Europea Espacial (ESA por sus siglas en inglés), fue diseñado para monitorear la atmósfera. El sensor es un espectrómetro de onda corta de visualización nadir que mide en el rango de longitud de onda UV-visible (270- 500 nm), el infrarrojo cercano (710-770 nm) e infrarrojo de onda corta (2314-2382 nm) (Eskes et al., 2021).

El instrumento utiliza técnicas de teledetección pasiva para lograr su objetivo, midiendo en la parte superior de la atmósfera la radiación solar reflejada y radiada por la Tierra. Captura imágenes de una franja de la Tierra en un detector bidimensional durante aproximadamente 1 segundo, período durante el cual el satélite se mueve alrededor de 7 km. Esta franja tiene dimensiones aproximadas de 2600 km en la dirección transversal a la trayectoria del satélite y 7 km en la dirección a lo largo de la trayectoria. Después de la medición de 1 segundo, se inicia una nueva medición, de modo que el instrumento escanea la Tierra mientras el satélite se mueve (Eskes et al., 2021).

Las dos dimensiones del detector se utilizan para detectar los diferentes píxeles de tierra en la dirección transversal a la trayectoria y para las diferentes longitudes de onda. El principio de medición de TROPOMI se muestra en la Figura 2 (Eskes et al., 2021).

El sensor captura datos con una resolución de aproximadamente 1 km, y una resolución temporal diaria. TROPOMI genera información de concentraciones de O_3 , NO_2 , SO_2 , CO , CH_4 , CH_2O y aerosoles, representando una gran ventaja frente a otros satélites (Veefkind et al., 2012).

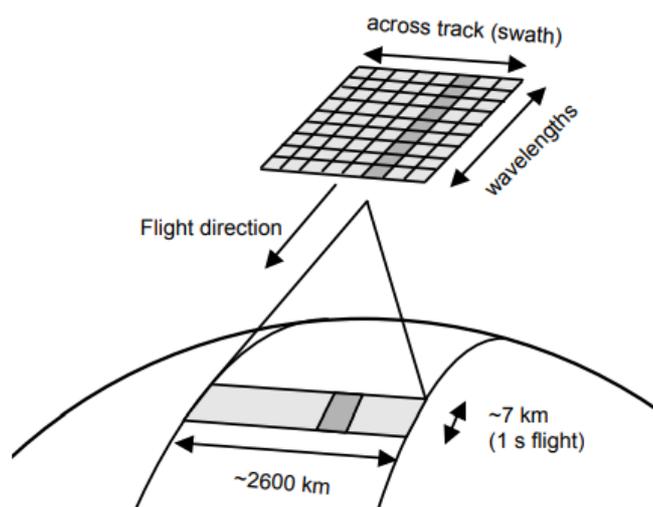


Figura 2. Principio de medición de TROPOMI (Eskes et al., 2021).

3.3 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

Los sistemas de información geográfica (SIG) son sistemas basados en computadora que pueden manejar prácticamente cualquier tipo de información sobre características que pueden ser referenciadas por ubicación geográfica. Estos sistemas son capaces de manejar tanto datos de ubicación como datos atributivos sobre tales características. Es decir, no solo los SIGs permiten el mapeo automatizado o la visualización de las ubicaciones de las características, sino que también estos sistemas proporcionan la capacidad de grabar y analizar características descriptivas ("atributos") de las características (Lillesand et al., 2015). Los sistemas de información geográfica permiten realizar las siguientes acciones:

- Lectura, edición, almacenamiento y gestión de datos espaciales
- Análisis de dichos datos. Esto puede incluir desde consultas sencillas a la elaboración de complejos modelos, y puede llevarse a cabo tanto sobre la componente espacial de los datos (la localización de cada valor o elemento) como sobre la componente temática (el valor o el elemento en sí).

- Generación de resultados tales como mapas, informes, gráficos, etc. (Olaya, 2014).

3.3.1 SUBSISTEMAS DE LOS SIG

Olaya (2014) menciona que, para entender de manera integral a los SIG, se tiene que identificar a los SIG como una serie de Subsistemas, cada uno de ellos encargado de una serie de funciones particulares, y son 3:

- Subsistema de datos. Encargado de las operaciones de entrada y salida de datos, y la gestión de estos dentro del SIG. Permite a los otros subsistemas tener acceso a los datos y realizar sus funciones en base a ellos.
- Subsistema de visualización y creación cartográfica. Crea representaciones a partir de los datos (mapas, leyendas, etc.), permitiendo así la interacción con ellos.
- Subsistema de análisis. Contiene métodos y procesos para el análisis de los datos geográficos.

Según Olaya, para que un SIG pueda considerarse una herramienta útil y válida con carácter general, debe incorporar estos tres subsistemas en cierta medida.

3.3.2 ELEMENTOS DE LOS SIG

Cinco son los elementos principales que se contemplan tradicionalmente en este aspecto:

- **Datos.** Los datos son la materia prima necesaria para el trabajo en un SIG.
- **Métodos.** Un conjunto de formulaciones y metodologías a aplicar sobre los datos.
- **Software.** Programas especializados para trabajar con los datos e implemente los métodos anteriores.
- **Hardware.** El equipo que permita ejecutar el software.
- **Personas.** Las personas son las encargadas de diseñar y utilizar el software (Olaya, 2014).

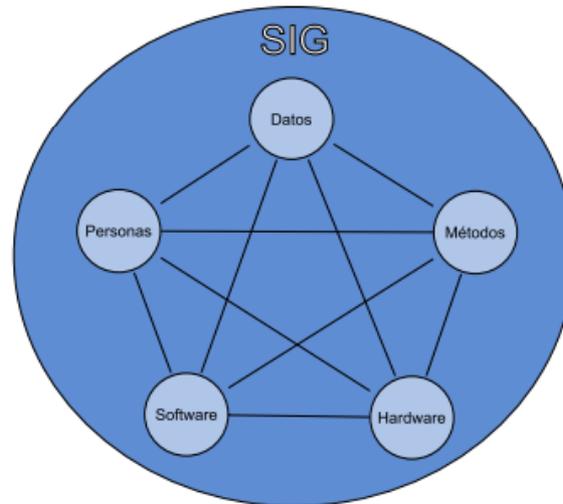


Figura 3. Elementos de los SIG según Olaya (2014).

3.3.3 GOOGLE EARTH ENGINE (GEE)

Google Earth Engine es una plataforma desarrollada por Google que permite realizar procesos geoespaciales a gran escala. Uno de los principales objetivos de esta plataforma es reducir el tiempo invertido en el procesamiento y facilitar los análisis realizados con información espacial. GEE nace de la necesidad de gestionar de una forma más eficiente la big data derivada de las misiones espaciales que se dedican a recopilar información remota, para lograr esto, Google creó una infraestructura con tres elementos clave: el catálogo de información, la capacidad computacional y las API. GEE recopiló la información geoespacial de diferentes fuentes alrededor del mundo y creó copias de esos datos con su propio data center, logrando almacenar más de 20 petabytes (20 000 000 de gigabytes) de información en un solo lugar (Solórzano Villegas y Perilla Suárez, 2022).

4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

4.1. ZONA DE ESTUDIO.

Ecuador es un país de Latinoamérica, ubicado en el noroccidente del subcontinente. Su territorio se extiende desde los $0^{\circ} 13' 07''$ sur, hasta los $78^{\circ} 30' 35''$ oeste. Limita al norte con Colombia, al sur y al este con Perú y al oeste con el Océano Pacífico (Figura 4). Posee una extensión de $256\,370\text{ km}^2$ (INEC, 2010) y una población de 17 510 643 millones de personas (INEC, 2020).

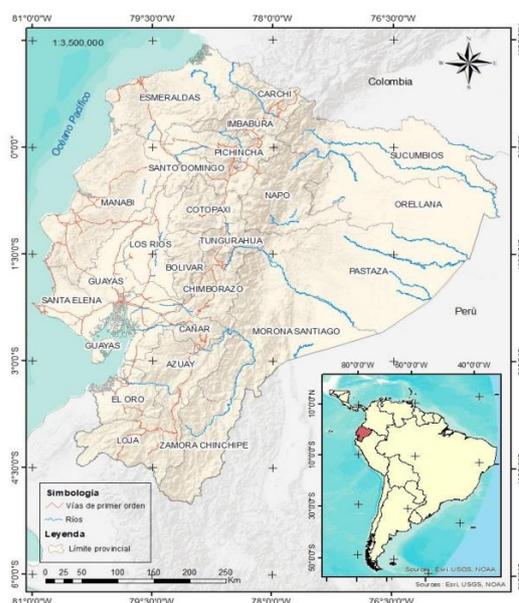


Figura 4. Mapa de ubicación del área de estudio. Fuente: (Guerrero García, 2021).

4.2. DESCARGA DE DATOS SATELITALES SENTINEL

5P

Se obtuvieron datos de concentraciones promedio mensuales de CO , NO_2 , SO_2 y CH_4 (Tabla 1) mediante el desarrollo de un código en lenguaje Python en un Jupyter

notebook, que mediante código se enlaza con la plataforma Google Earth Engine (GEE) (Figura 5).

```
In [ ]: # !pip install geemap

In [ ]: import ee
import geemap
import os
```

Figura 5. Enlace de Jupyter con Google Earth Engine (GEE). Fuente: Elaboración propia

El código generado itera a través de cada provincia, obteniendo los datos promedio mensuales que midió el satélite desde el año 2018 hasta el año 2023 (Anexo 1). Este código genera un archivo .csv que contiene información de provincia y concentración a lo largo de los años de estudio.

Tabla 1. Características del Satelite Sentinel 5P TROPOMI (Earth Engine Data catalog, 2018).

Contaminante	Sensor/Banda	Resolución Espacial	Resolución Temporal	Unidades
CO	CO_column_number_density	1x1 km	30 minutos	mol/m^2
SO ₂	SO ₂ _column_number_density	1x1 km	30 minutos	mol/m^2
NO ₂	tropospheric_NO ₂ _column_number_density	1x1 km	30 minutos	mol/m^2
CH ₄	CH ₄ _column_volume_mixing_ratio_dry_air	1x1 km	30 minutos	mol fraction

4.3. PROCESAMIENTO DE DATOS SATELITALES

En el caso de los contaminantes CO, NO₂ y SO₂, se obtuvieron series temporales completas, sin datos faltantes en el periodo de estudio 2018-2023 (Tabla 2). En el caso de CH₄, se realizó una depuración preliminar, en donde se eliminaron las celdas en donde no existían datos (Tabla 3).

Tabla 2. Disponibilidad de datos de Sentinel-5P TROPOMI.

Contaminante	Disponibilidad de datos en Ecuador
Sentinel-5P OFFL CO: Offline Carbon Monoxide	Desde 2018-07-01
Sentinel-5P OFFL NO ₂ : Offline Nitrogen Dioxide	Desde 2018-11-01
Sentinel-5P OFFL SO ₂ : Offline Sulfur Dioxide	Desde 2018-11-01

Tabla 3. Disponibilidad de datos de CH₄. (La X representa existencia de datos)

Sentinel-5P OFFL CH ₄ : Offline Methane					
Mes\Año	2019	2020	2021	2022	2023
Enero			X	X	X
Febrero					
Marzo					
Abril	X				
Mayo				X	X
Junio				X	X
Julio				X	
Agosto	X		X		X
Septiembre	X	X	X	X	X
Octubre	X		X	X	X
Noviembre		X	X	X	
Diciembre				X	X

4.4. ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LOS NIVELES DE CONCENTRACIÓN DE LOS CONTAMINANTES DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO), DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO₂), DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂) Y METANO (CH₄) DURANTE LOS AÑOS 2018 - 2023 A TRAVÉS DE IMÁGENES SATELITALES DEL SATÉLITE SENTINEL-5P TROPOMI.

Para el análisis espaciotemporal se diseñaron gráficos de tendencias temporales que muestran la variación de los niveles de CO, NO₂, SO₂ y CH₄ a lo largo de los años de estudio de las principales provincias del Ecuador: Pichincha, Guayas y Azuay

4.5. ESTABLECER UNA PROYECCIÓN MEDIANTE UN MODELO MATEMÁTICO DE LOS PUNTOS CRÍTICOS DE CONTAMINACIÓN DE AIRE EN EL ECUADOR PARA ESTABLECER MEDIDAS DE GESTIÓN AMBIENTAL

Modelo ARIMA

Para este objetivo se siguió la metodología establecida por Cerón (2023), mediante código en RStudio (Anexo 2), este código se adaptó para cada provincia y cada contaminante al realizar el modelo. El modelo se realizó a nivel Nacional y en las principales provincias de Ecuador Pichincha, Guayas y Azuay y se desarrolló para tres contaminantes: CO, NO₂ y SO₂

Por cada provincia se trabajó con 3 archivos Excel (Figura 6), que contienen los datos de concentración de los 3 contaminantes de estudio CO, NO₂ y SO₂. Por lo tanto, el

código para realizar el modelo ARIMA varía dependiendo del contaminante y la provincia a la que se le aplique el modelo.

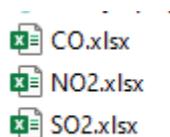


Figura 6. Archivos Excel con los datos de concentración de los diferentes contaminantes. Fuente: Elaboración propia

Validación de estacionariedad de las series de datos

Un modelo ARIMA requiere que la serie sea estacionaria. Se dice que una serie es estacionaria cuando su media, varianza y autocovarianza son invariantes en el tiempo. Esta suposición tiene un sentido intuitivo: dado que ARIMA usa retardos previos de series para modelar su comportamiento (Cerón, 2023).

Para probar esto, se realizó una prueba de Dickey Fuller, con el código que se muestra en la Figura 7.

```
#####TEST de Dickey Fuller#####  
#Cargar el paquete tseries  
library(tseries)  
# Realizar prueba de raíz unitaria  
adf.test(CO)
```

Figura 7. Test de Dickey-Fuller en RStudio. Fuente: Elaboración propia

Cuando la serie es no estacionaria se debe diferenciarla hasta que logre serlo, en el caso de que la serie original de datos tiene un componente estacional importante podemos trabajar con la serie ajustada por estacionalidad (Cerón, 2023).

Estimación de posibles modelos

La forma del modelo ARIMA es (p,d,q) , para determinar el modelo más óptimo, se aplicó la función `auto.arima`, que determina los valores p , d y q , como se muestra en la Figura 8.

```
#Aplicamos la función auto.arima:  
auto.arima(CO_SA)
```

Figura 8. Función autoarima en RStudio. Fuente: Elaboración propia

Validación del Modelo generado

Prueba de Ljung-Box

Esta prueba evalúa si hay o no correlación en los residuos, en el caso de que el valor P sea mayor a 0.05, se concluye que los residuos son ruido blanco, es decir que no se correlacionan los errores (Cerón, 2023). Para esto se aplicó la función Box.test al modelo anteriormente generado como se muestra en la Figura 9.

```
# Con la prueba de Ljung-Box, se evalúa si hay o no autocorrelación en los residuos:  
#  
Model2=Arima(CO_SA,order = c(1,0,0))  
Box.test(Model2$residuals, lag = 20, type = "Ljung-Box")
```

Figura 9. Función Box.test en RStudio. Fuente: Elaboración propia

Prueba de Shapiro-Wilk

Para validar si los residuos se distribuyen de forma normal, se aplicó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, que es una prueba estadística utilizada para determinar si una serie de datos sigue una distribución normal. Si el valor P es menor que un nivel de significancia de 0.05, se puede rechazar la hipótesis nula y concluir que la muestra no sigue una distribución normal (Cerón, 2023). Para esto, se aplicó la función shapiro.test en RStudio como indica la Figura 10.

```
# PRUEBA DE SHAPIRO WILK  
shapiro.test(Model2$residuals)  
##
```

Figura 10. Función shapiro.test en RStudio. Fuente: Elaboración propia

Pronóstico

Se realizó un pronóstico de 3 y 6 meses, con un parámetro $c(95)$ para un nivel de confianza del 95% (Cerón, 2023). Para esto se aplicó la función `forecast` en RStudio, como muestra la Figura 11.

```
#Se hace pronóstico a 3 y 06 meses.  
#Se elije el parametro c(95) para que sea a un nivel de confianza del 95%  
  
Pronostico3=forecast(Model2,level= c(95), h=3)  
plot(Pronostico3)  
  
Pronostico3  
  
Pronostico6=forecast(Model2,level= c(95), h=6)  
plot(Pronostico6)  
  
Pronostico6
```

Figura 11. Función `forecast` en RStudio. Fuente: Elaboración propia

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. REALIZAR UN ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE LOS NIVELES DE CONCENTRACIÓN DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO), DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO₂), DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂) Y METANO (CH₄) DURANTE LOS AÑOS 2018 - 2023 A TRAVÉS DE IMÁGENES SATELITALES DEL SATÉLITE SENTINEL-5P TROPOMI.

El análisis de concentraciones de los diferentes contaminantes en Ecuador se hizo con el promedio de todas las provincias.

Concentraciones de SO₂

Como se observa en la Figura 12, las concentraciones de SO₂ en Ecuador tienen una tendencia a elevarse conforme pasa el tiempo. En 2018 y principios de 2019 hay valores negativos porque, según la documentación oficial, valores cercanos a cero y negativos se relacionan con zonas limpias, con valores cercanos a 0 (ESA, 2023) o aerosoles no absorbentes y nubes (NASA, s.f.). Por otro lado, se observa que la concentración de SO₂ en Ecuador alcanzó su valor máximo en marzo de 2021, mes en donde se registró una fuerte actividad eruptiva del volcán Sangay, en donde se evidenció caída de ceniza de origen volcánico en las provincias de Chimborazo, Bolívar, Cañar, Santa Elena y Los Ríos (SGR, 2021) con un valor de 4.4×10^{-4} mol/m², seguido de un pico en diciembre de 2022 con un valor de 2.7×10^{-4} mol/m² y finalmente un pico en octubre de 2023 con un valor de 1.9×10^{-4} mol/m².

En el periodo prepandemia se puede observar que el valor máximo de concentración es registrado en el mes de febrero de 2020 con un $9.12 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$, al siguiente mes, es decir, en el inicio del periodo pandemia se puede ver una disminución considerable con un $3.34 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$ en marzo de 2020, y llegando hasta un $2.33 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$ en mayo, para luego aumentar nuevamente en el periodo de postpandemia, el primer aumento notable se registra en el mes junio de 2020 con $5.72 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$, para en los meses posteriores aumentar paulatinamente, hasta llegar a los picos máximos de concentración anteriormente mencionados.

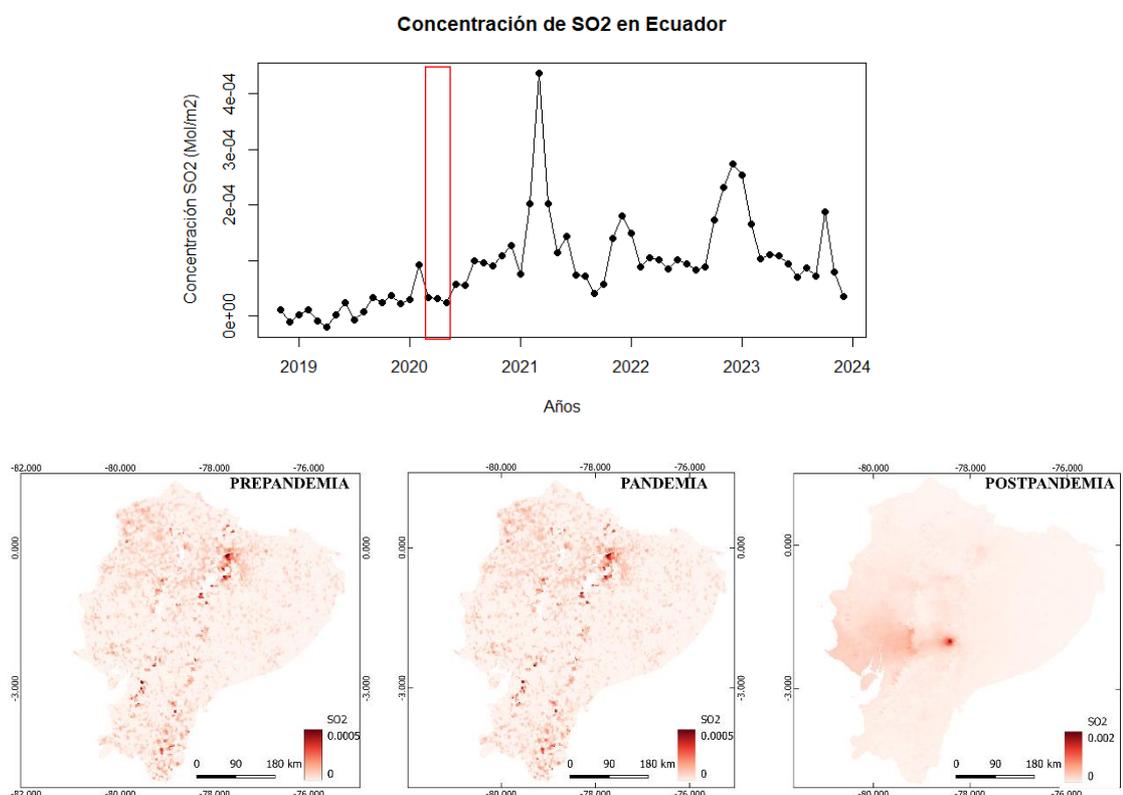


Figura 12. Concentración de SO_2 en Ecuador (El recuadro rojo indica el periodo de confinamiento de marzo a mayo del 2020).

Concentraciones de NO_2

Como se observa en la Figura 13 las concentraciones de NO_2 presentan un patrón en el que las concentraciones tienden a elevarse desde marzo de cada año y alcanzando valores máximos en los meses agosto, septiembre, octubre y

noviembre, Posteriormente, las concentraciones disminuyen gradualmente hasta alcanzar los valores más bajos en diciembre, enero y febrero. Los valores máximos de NO_2 se registraron en los años 2021 y 2022, en septiembre de 2022 se alcanzó el valor más alto registrado hasta la fecha con una concentración de $4.94 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$ y en el mes octubre de 2021 con un valor de $4.91 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$.

Por otro lado, los valores más de NO_2 se registraron en febrero del 2020 y 2021, con valores de $3.29 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$ y $3.32 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$ respectivamente.

Si bien, a primera vista en el periodo de pandemia las concentraciones tienden a crecer, se debe tomar en cuenta lo anteriormente señalado, las concentraciones de este gas siguen un patrón en el que van aumentando desde el mes de marzo de cada año, dicho esto, si comparamos la concentración de marzo de 2019 de $3.73 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$ con la concentración de marzo de 2020 de $3.33 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$, la reducción en la concentración es notoria, sin embargo en mayo de 2020 las concentraciones vuelven a aumentar hasta llegar a $3.83 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$, para luego en el periodo postpandemia alcanzar los picos máximos de concentración anteriormente mencionados.

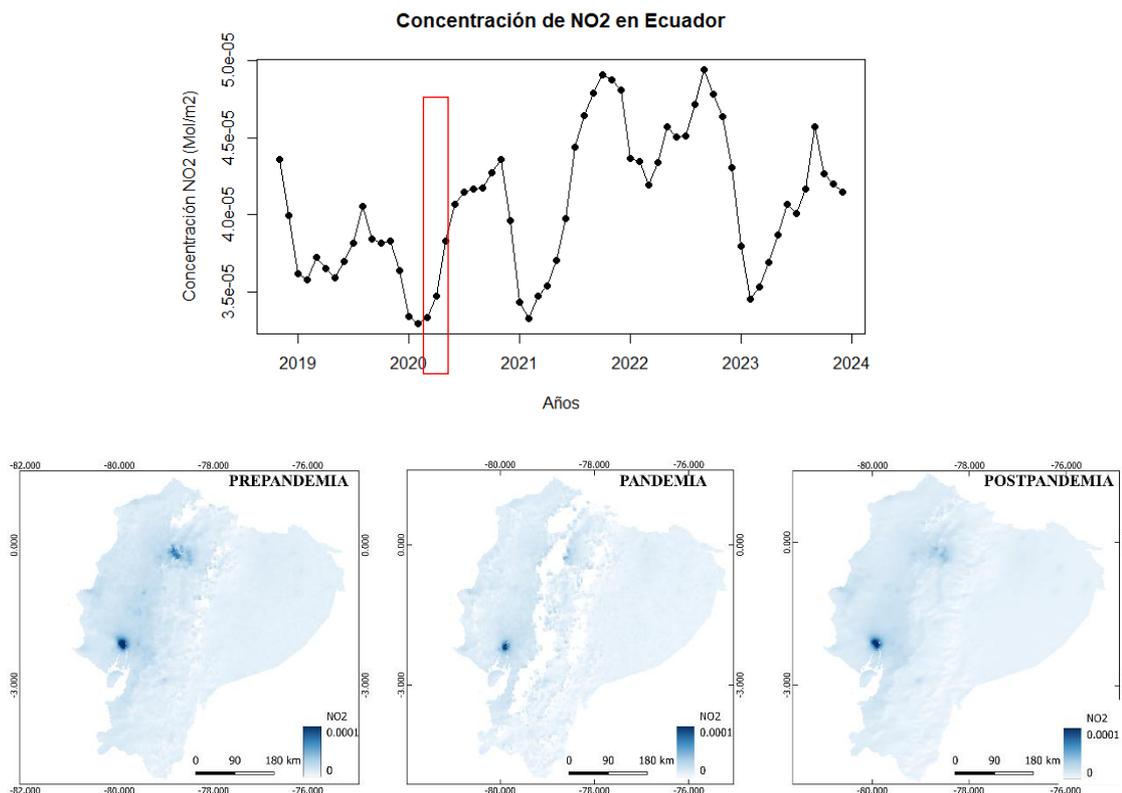


Figura 13. Concentración de NO₂ en Ecuador (El recuadro rojo indica el periodo de confinamiento de marzo a mayo del 2020).

Concentraciones de CO

Como se observa en la Figura 14, las concentraciones de CO presentan un patrón anual en el que se alcanzan dos picos máximos por año. Estos picos se observan principalmente entre los meses de febrero-marzo y agosto-septiembre. Los valores máximos fueron alcanzados en el año 2019 en el mes de marzo con una concentración de 3.91×10^{-2} mol/m² y en agosto con una concentración de 3.47×10^{-2} mol/m²; seguido por el año 2023 en octubre, con una concentración de 3.83×10^{-2} mol/m² y finalmente el año 2020 en donde también se observa valores elevados en el mes de agosto con una concentración de 2.99×10^{-2} mol/m². Por otro lado, los valores más bajos se encontraron en diciembre de 2021, con una concentración de 2.40×10^{-2} mol/m² y junio de 2019 con una concentración de 2.42×10^{-2} mol/m².

Si bien, a primera vista en el periodo de pandemia las concentraciones tienden a disminuir, se debe tomar en cuenta lo anteriormente señalado, las concentraciones de este gas siguen un patrón en el que se alcanzan dos picos máximos por año, el primer pico se presenta entre los meses febrero-marzo, dicho esto, si comparamos la concentración de marzo de 2019 de 3.91×10^{-2} mol/m² con la concentración de marzo de 2020 de 3.36×10^{-2} mol/m², la reducción en la concentración es notoria, el valor más bajo del periodo pandemia se registra en el mes mayo con 2.9×10^{-2} mol/m², para luego en el periodo postpandemia alcanzar los picos máximos de concentración anteriormente mencionados.

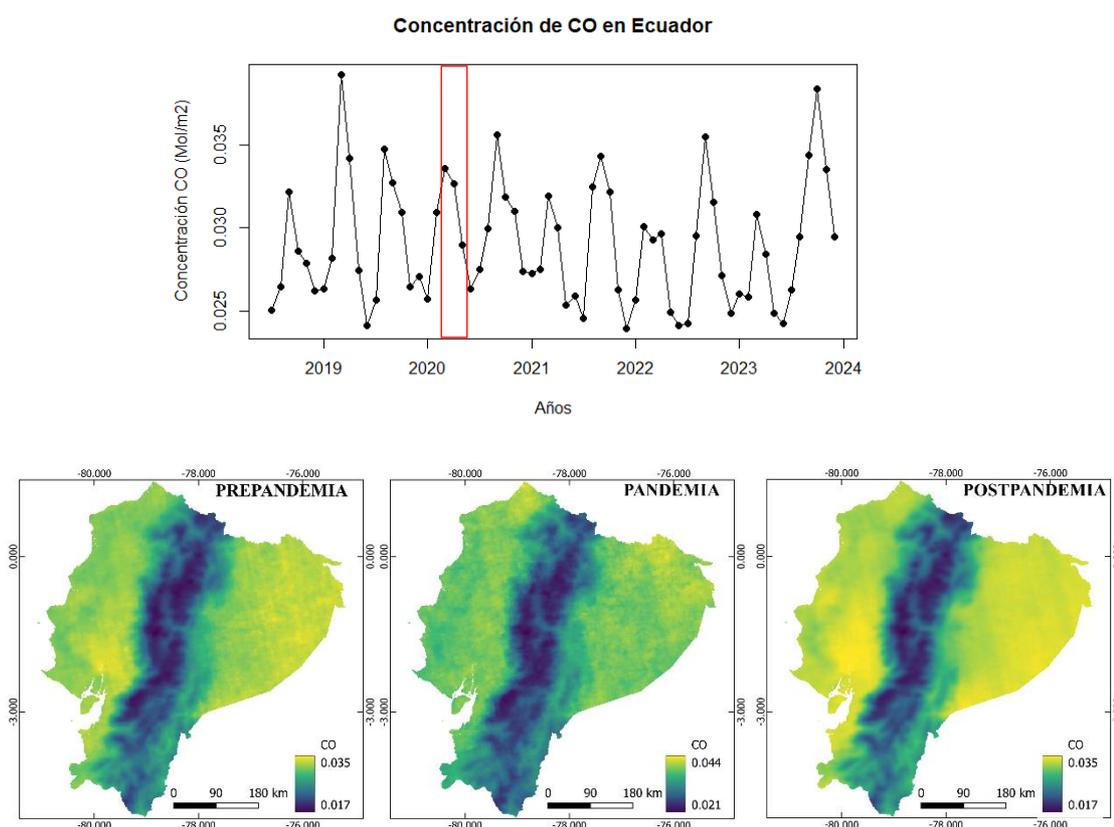


Figura 14. Concentración de CO en Ecuador (El recuadro rojo indica el periodo de confinamiento de marzo a mayo del 2020)

González et al., (2022) realizaron un estudio en el que comparan las concentraciones de CO en Ecuador en los periodos 16 de marzo – 16 de abril de 2019 y 16 de marzo – 16 de abril de 2020, en el estudio determinaron que las concentraciones en 2019 varían de 2.37×10^{-2} a 5.79×10^{-2} mol/m² y en 2020 varían de 1.83×10^{-2} a 5.38×10^{-2} mol/m², que significa una reducción del -7% en las concentraciones de CO a nivel nacional (González, Monrroy, Ochoa, y Oviedo, 2022). Lo anteriormente dicho concuerda con lo encontrado en este estudio, en donde se encontró que en el periodo de 1 de marzo – 31 de abril de 2019, las concentraciones varían de 3.42×10^{-2} a 3.92×10^{-2} mol/m² y en el periodo de 1 de marzo – 31 de abril de 2020, las concentraciones varían de 3.27×10^{-2} a 3.36×10^{-2} mol/m², que representa una disminución del -4.47%. Si bien las cifras no coinciden exactamente, cabe mencionar que no son los mismos periodos de tiempo de análisis.

Adicional a esto, si observamos los valores de mediana, podemos observar que, a nivel nacional, en el periodo de pandemia hay un aumento de 18.01%, un 16.05% en Azuay, 13.91% en Guayas y un 17.43% en Pichincha. Es en el periodo de postpandemia cuando las concentraciones empiezan a disminuir: a nivel nacional disminuye en un -12.9%, en Azuay un -11.56%, en Guayas un -10.17% y en Pichincha un -13.03% (Figura 15).

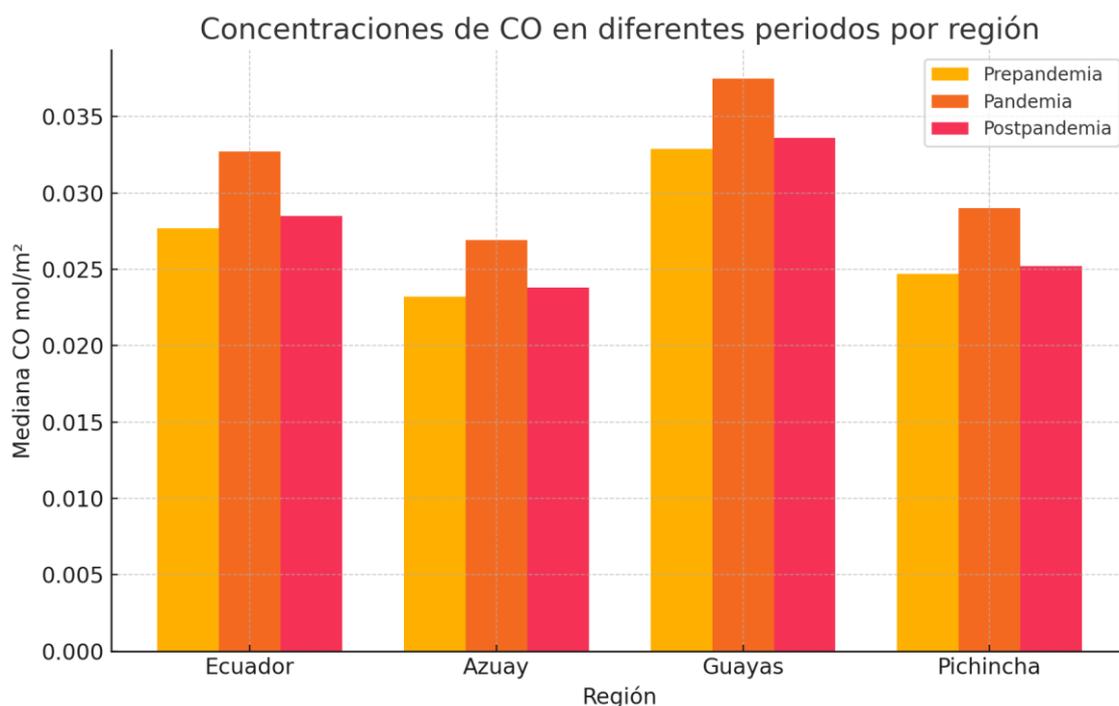


Figura 15. Variaciones de CO mol/m²

Concentraciones de CH₄

Como muestra la Figura 16, la concentración de CH₄ en Ecuador tiende a aumentar, esto en parte debido a la ausencia de una serie de tiempo continua, debido a que hay fechas en las cuales el satélite no midió este contaminante en el área geográfica correspondiente a Ecuador. Sin embargo, se puede observar que el valor máximo fue registrado en el mes de mayo de 2023, con una concentración de 1893.79 Mol fraction, seguido por el mes de septiembre de 2022, con 1887.44 Mol fraction y finalmente septiembre de 2023 con 1883.74 Mol fraction. Los valores más bajos fueron registrados en octubre de 2019 con 1831.16 Mol fraction y en noviembre del 2020 con 1835.29 Mol fraction.

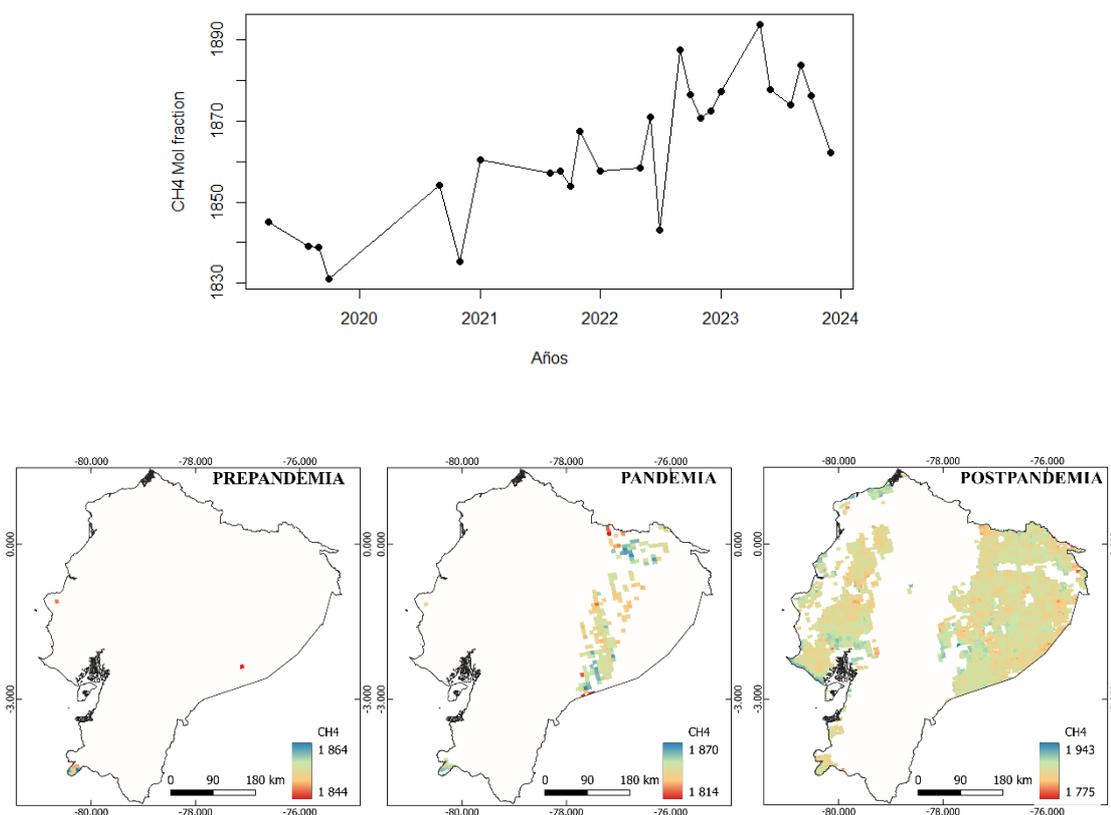
Concentración de CH₄ en Ecuador

Figura 16. Concentración de CH₄ en Ecuador.

Debido a la falta de datos en los meses correspondientes al periodo de pandemia, no se pudo hacer un análisis de concentraciones a nivel de prepandemia, pandemia y postpandemia, sin embargo, con los datos disponibles se hizo un análisis de las variaciones anuales de 2019 a 2023.

Como se observa en la Figura 17, en el 2020, el año de la pandemia, hubo un aumento del 0.32% en las concentraciones de CH₄ a nivel nacional. Lamentablemente no existen investigaciones similares con las que se pueda hacer una comparación, no existen siquiera investigaciones que aborden el tema a nivel de ciudades o provincias, como es el caso de los otros contaminantes que se analizó en esta investigación.

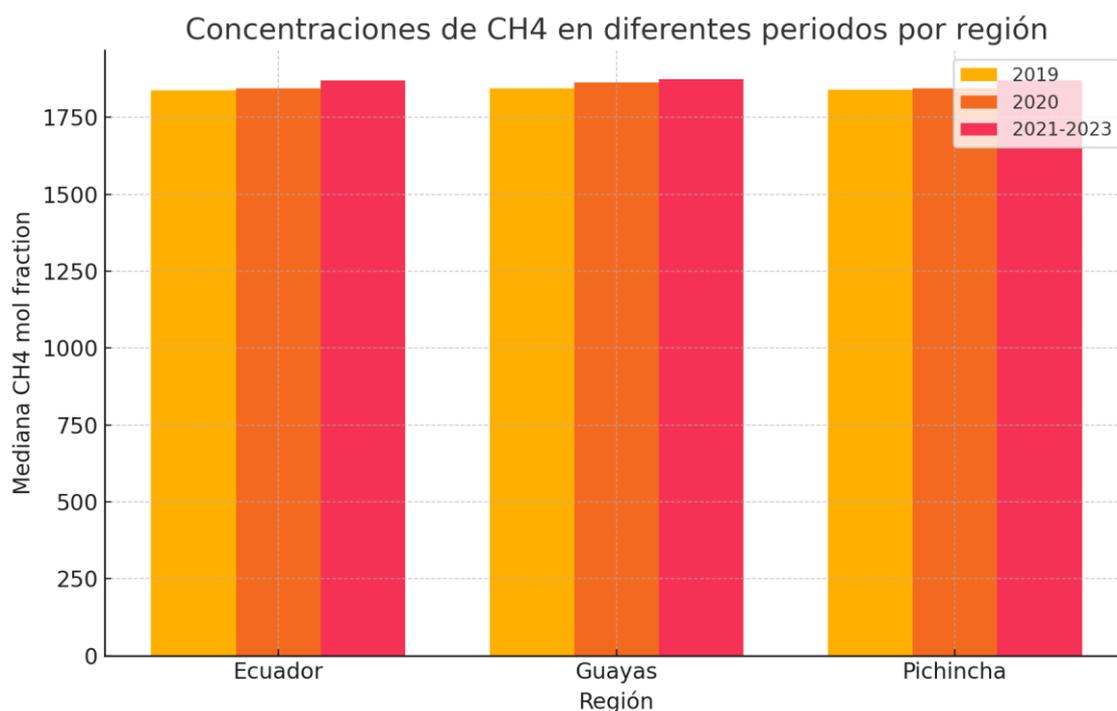


Figura 17. Variaciones de CH₄ mol fraction

Sin embargo, en el estudio de Peng et al., (2022) se encuentra un aumento en las concentraciones de CH₄ a nivel global, contrario a la esperada disminución en las concentraciones por la pandemia. En su estudio explica que las 3 principales fuentes de CH₄ son las emisiones antropogénicas, los incendios forestales y los humedales. En el año 2020, las emisiones por actividades antropogénicas y por los incendios forestales se redujeron considerablemente. El estudio muestra que las regiones con mayor área de humedales del mundo estuvieron expuestas a condiciones más cálidas y húmedas en 2020 en comparación con años anteriores, con una precipitación anual que osciló entre un 2 y un 11% más alta en relación con 2019. Junto con temperaturas más cálidas, estas condiciones fueron más favorables para el aumento de los microbios productores de metano. Este hallazgo explica el porqué de mayores emisiones naturales de humedales, contribuyendo al 47% del aumento de emisiones.

Se sabe que el NO_x afecta las concentraciones atmosféricas de radicales hidroxilos (OH), que actúan como un sumidero principal de metano. Usando datos de combustión de combustibles fósiles, modelos de transporte químico y modelos

atmosféricos 3D de metano, el equipo detectó una caída en la concentración de OH troposférico en 2020. Esto se debió principalmente a menores emisiones antropogénicas de NO_x . A su vez, la eliminación global de metano por reacción con OH disminuyó en aproximadamente 7.5 Tg CH_4 por año, contribuyendo al 53% del aumento de emisiones (Peng et al., 2022).

5.2. COMPARAR MEDIANTE UN ANÁLISIS GEOESPACIAL Y ESTADÍSTICO LA CONCENTRACIÓN DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO), DIÓXIDO DE NITRÓGENO (NO_2), DIÓXIDO DE AZUFRE (SO_2) Y METANO (CH_4) EN LOS PERIODOS PREPANDEMIA, DURANTE Y POSTPANDEMIA EN LAS PRINCIPALES CIUDADES DEL ECUADOR.

Concentración de SO_2

En Ecuador, las medidas de restricción empezaron desde el día 16 de marzo de 2020, y terminaron el 4 de mayo de 2020 (El Comercio, 2020).

Como se observa en la Figura 16, las medidas de restricción tuvieron un impacto notable en las concentraciones de SO_2 en las 3 provincias de estudio.

Para la provincia de Azuay se observa que el periodo prepandemia, las concentraciones de SO_2 estaban en aumento, hasta llegar a un pico de concentración en el mes de diciembre de 2019 con $6.53 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$, en el periodo de pandemia las concentraciones disminuyeron hasta llegar a una concentración de $-2 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$ en abril de 2020, para en mayo aumentar la concentración hasta $4.73 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$, con la eliminación de las medidas de restricción. El periodo

postpandemia es el periodo que registra mayores concentraciones, llegando a los 4.19×10^{-4} mol/m² en el mes de marzo de 2021, siendo este mes el que mayor concentración registra en el periodo 2018-2023 (Figura 18 a).

En estas dos provincias las mayores concentraciones de este contaminante fueron registradas en marzo de 2021, esto coincide con la fuerte actividad eruptiva del volcán Sangay (SGR, 2021)

Para Guayas, se observa que el periodo de prepandemia las concentraciones de SO₂ estaban en aumento hasta llegar a un pico de concentración en febrero de 2020 con un 3.70×10^{-4} mol/m². En el periodo de pandemia, se observa una disminución considerable en el mes de marzo de 2020 con una concentración de 5.64×10^{-5} mol/m², para en junio aumentar a 2.04×10^{-4} mol/m², con la eliminación de las medidas de restricción. El periodo postpandemia es el periodo que registra mayores concentraciones, llegando a los 1.19×10^{-3} mol/m² en el mes de marzo de 2021, siendo este mes el que mayor concentración registra en el periodo 2018-2023 (Figura 18 c).

En el caso de la provincia de Pichincha se observa que el periodo prepandemia, las concentraciones de SO₂ se mantenían estables, hasta llegar a un pico de concentración en abril de 2019 con un 3.55×10^{-5} mol/m², para luego ir disminuyendo la concentración hasta que, en febrero de 2020, alcanzó una concentración de 2.6×10^{-5} mol/m². En el periodo de pandemia, se observa una disminución notable, llegando a su concentración más baja en el mes mayo de 2020 con un -4.13×10^{-6} mol/m², para en junio aumentar a 8.15×10^{-6} mol/m², con la eliminación de las medidas de restricción. El periodo postpandemia es el periodo que registra mayores concentraciones, llegando a los 3.75×10^{-4} mol/m² en el mes de diciembre de 2022, siendo este mes el que mayor concentración registra en el periodo 2018-2023 (Figura 18 b).

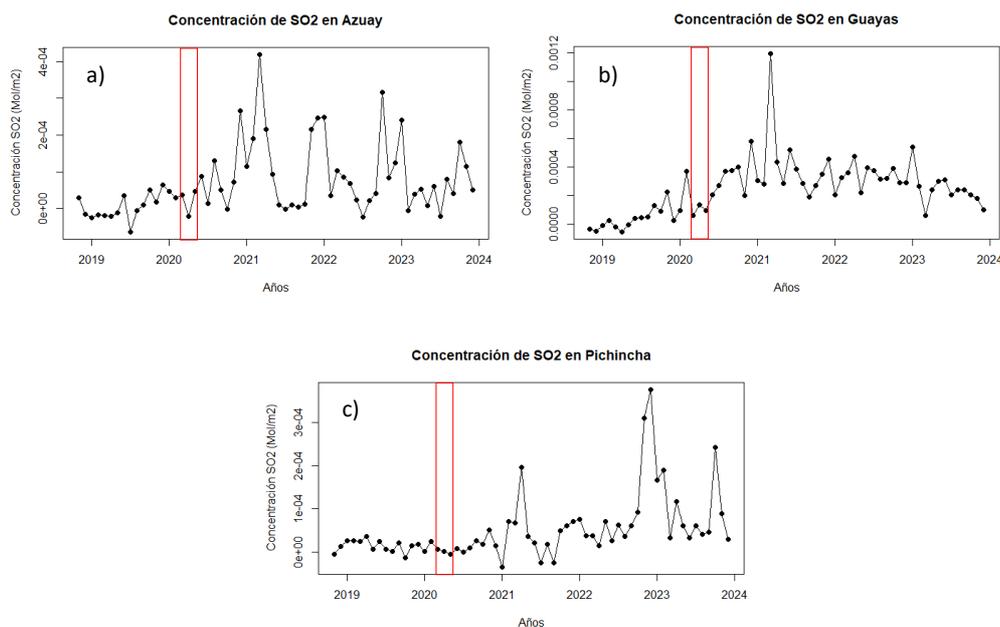


Figura 18. Concentración de SO₂ en Azuay, Pichincha y Guayas. (El recuadro rojo indica el periodo de confinamiento de marzo a mayo del 2020).

En el estudio realizado por Atiaga et al., (2023), realiza un análisis de concentraciones de SO₂ en el periodo 2018 – marzo de 2023, en el que menciona que durante la pandemia no hubo variaciones considerables en la provincia de Guayas y en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). Esto contradice a lo determinado en esta investigación, en donde se encontró que, durante la pandemia, a nivel nacional, hubo un aumento del 37.99%, en Guayas hubo un aumento del 38.66% y en Pichincha una disminución del -79.59% (Figura 19). Sin embargo, los autores mencionan que existe un aumento notable en las concentraciones de SO₂ en el periodo postpandemia, determinando que Guayas registra un aumento del 380% (Atiaga et al., 2023), en esta investigación se determinó que el aumento en Guayas fue de 212.10%. Las diferencias en los porcentajes pueden deberse a los procedimientos metodológicos empleados por cada investigador. Sin embargo, en ambos estudios se determina que hay un aumento en las concentraciones en el periodo postpandemia.

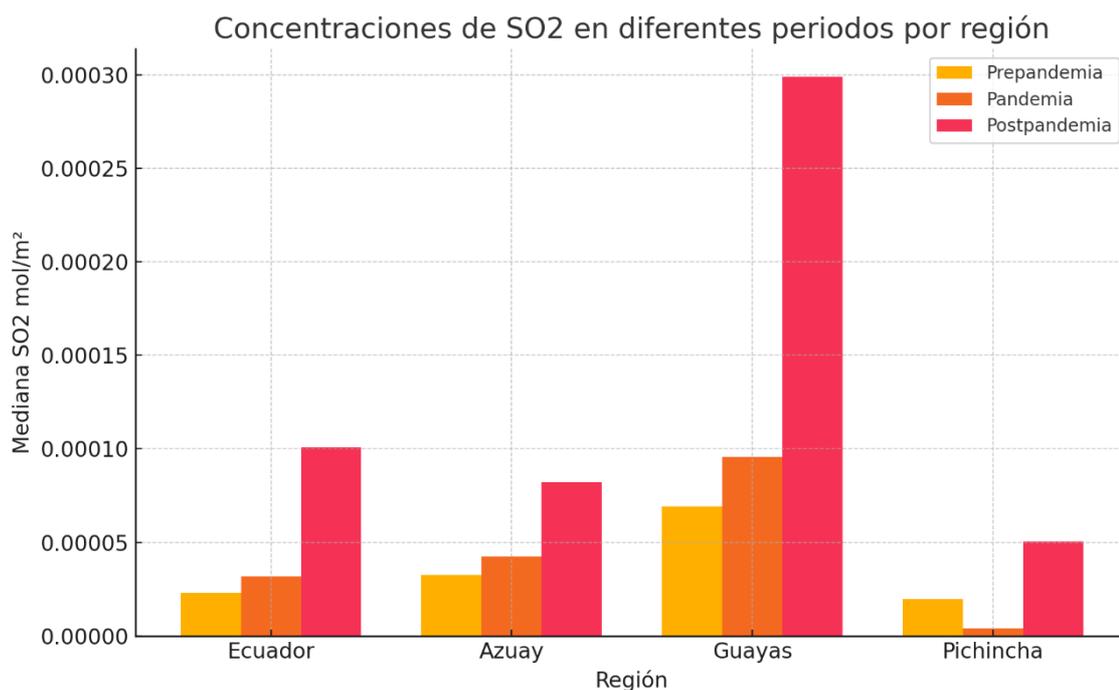


Figura 19. Variaciones de SO₂ mol/m²

Concentraciones de NO₂

Como se observa en la Figura 20, las medidas restrictivas tuvieron gran impacto en las concentraciones de NO₂.

En Azuay, en el periodo prepandemia, las concentraciones más altas se registraron en noviembre de 2018 con un 4.2×10^{-5} mol/m² para luego ir disminuyendo paulatinamente, llegando a su concentración más baja en febrero de 2020 con 3.15×10^{-5} mol/m². En el periodo de pandemia las concentraciones empezaron a elevarse hasta llegar a una concentración de 3.60×10^{-5} mol/m² en el mes de mayo de 2020. En el periodo postpandemia se registran concentraciones más elevadas, siendo el mes de noviembre de 2021 con 4.60×10^{-5} mol/m² y septiembre de 2022 con 4.58×10^{-5} mol/m² los meses que presenta mayor concentración en el periodo 2018-2023 (Figura 20 a).

En Guayas, en el periodo prepandemia, las concentraciones más altas se registraron en noviembre 2018 con un 5.45×10^{-5} mol/m² para ir disminuyendo paulatinamente, llegando a su concentración más baja en febrero de 2020 con 3.99×10^{-5} mol/m². En el periodo de pandemia, el primer mes se observa una disminución en la

concentración, llegando a un 3.92×10^{-5} mol/m², para luego elevarse nuevamente, llegando a un 4.44×10^{-5} mol/m² en mayo de 2020. En el periodo postpandemia se registran concentraciones más elevadas, siendo el mes de octubre de 2021 con 6.27×10^{-5} mol/m² y septiembre de 2022 con 6.32×10^{-5} mol/m² los meses que presenta mayor concentración en el periodo 2018-2023 (Figura 20 b).

En Pichincha, en el periodo prepandemia, las concentraciones más altas se registraron en noviembre de 2018 con un 5.06×10^{-5} mol/m² para ir disminuyendo paulatinamente, llegando a su concentración más baja en enero de 2020 con 3.72×10^{-5} mol/m². En el periodo de pandemia, el primer mes se observa una disminución en la concentración llegando a un 3.58×10^{-5} mol/m², para luego elevarse nuevamente, llegando a un 4.18×10^{-5} mol/m² en mayo de 2020. En el periodo postpandemia se registran concentraciones más elevadas, siendo el mes de septiembre de 2023 con 5.67×10^{-5} mol/m², octubre de 2022 con 5.62×10^{-5} mol/m² y octubre de 2021 con 5.61×10^{-5} mol/m² los meses que presentan mayor concentración en el periodo 2018-2023 (Figura 20 c).

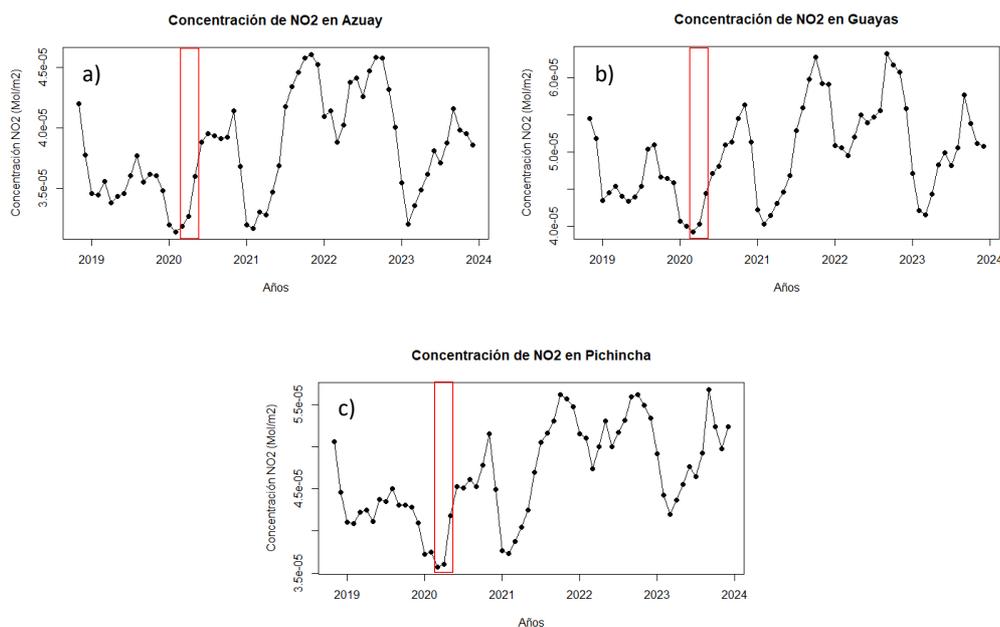


Figura 20. Concentración de NO₂ en Azuay, Guayas y Pichincha. (El recuadro rojo indica el periodo de confinamiento de marzo a mayo del 2020).

En el estudio de Pacheco et al., (2020) se realizó un análisis de las concentraciones de NO₂ en Ecuador, en el periodo 16 – 31 de marzo 2019 y 16 – 31 marzo 2020, y determinaron que hubo una reducción del -13% en la concentración del contaminante a nivel nacional; -23.36% en Guayaquil, -22.41% en Quito y -15.03% en Cuenca. Esto tiene cierta relación con lo obtenido en esta investigación, en donde se obtuvo que a nivel nacional la reducción fue del -6.44%; -11.33% en Guayas; -15.50% en Pichincha y -7.03% en Azuay (Figura 21).

Las diferencias en los porcentajes se debe a dos razones, primero el lapso de tiempo de análisis, este estudio se realizó con datos mensuales desde el 2019 al 2023, además para sacar los porcentajes de reducción este estudio utilizó mediana, mientras que el estudio de (Pacheco et al., 2020) trabajó con promedios. Un factor importante para considerar es que el estudio anteriormente mencionado trabaja a nivel de ciudades, mientras que este estudio trabajó a nivel de provincias; estos factores influyen a las medidas de reducción total del contaminante. Sin embargo, las dos investigaciones concluyen que hubo una reducción significativa en las concentraciones del contaminante en las principales ciudades del Ecuador.

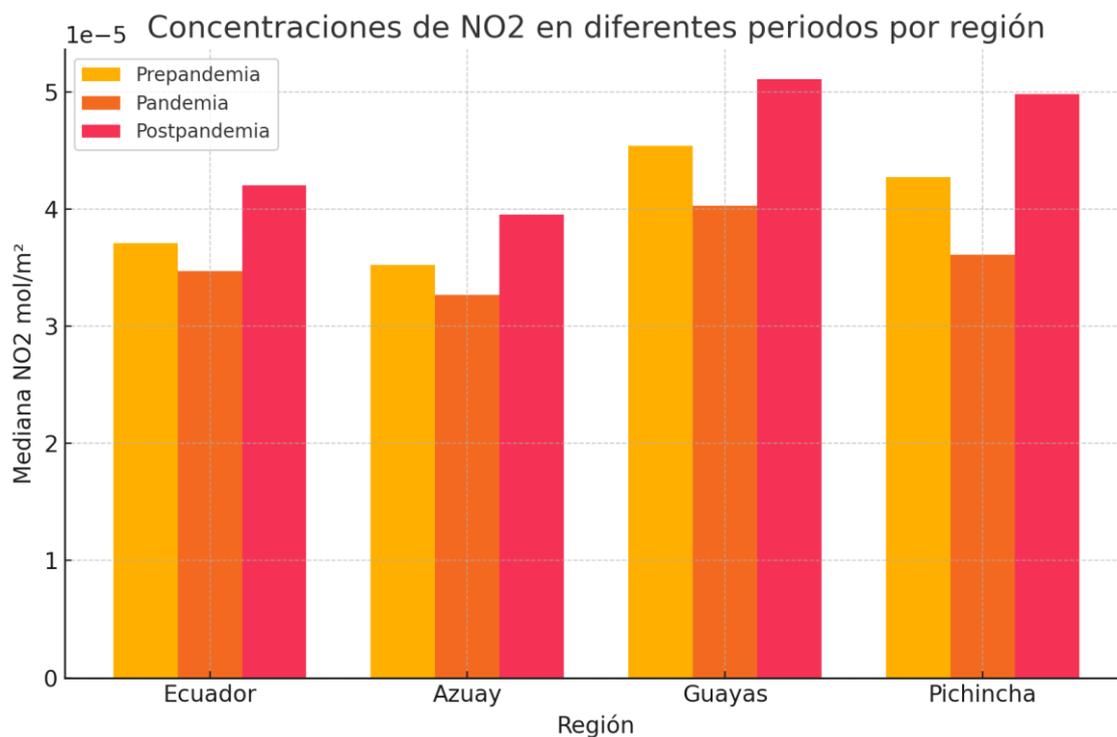


Figura 21. Variaciones de NO₂ mol/m²

Concentraciones de CO

Como se observa en la Figura 22, las medidas restrictivas tuvieron gran impacto en las concentraciones de CO. Las tendencias siguen un patrón definido en el que se alcanzan dos picos de concentración al año, el primero entre los meses febrero, marzo y abril; y el segundo entre los meses agosto, septiembre y octubre.

En el caso de Azuay, en el periodo prepandemia se observa que el nivel máximo de concentración de CO se alcanzó en marzo de 2019 con un 3.29×10^{-2} mol/m² y en agosto con 2.93×10^{-2} mol/m², en el periodo de pandemia se observa que el primer pico de concentración se alcanza en el mes de marzo de 2020 con 2.7×10^{-2} mol/m², esto significa una reducción de -5.9×10^{-3} mol/m² respecto al año anterior. En el periodo postpandemia se observa que se alcanzan concentraciones mucho más altas, siendo el mes de octubre de 2023 el mes que presenta la mayor concentración en el periodo 2018-2023 con 3.4×10^{-2} mol/m² (Figura 22 a).

En Guayas, en el periodo prepandemia el nivel máximo de concentración de CO se alcanzó en marzo de 2019 con un 4.3×10^{-2} mol/m² y en agosto con 4.1×10^{-2} mol/m²,

en el periodo de pandemia se observa que el primer pico de concentración se alcanza en el mes de mayo de 2020 con $3.4 \times 10^{-2} \text{ mol/m}^2$, esto significa una reducción de $-9 \times 10^{-2} \text{ mol/m}^2$ respecto al año anterior. En el periodo postpandemia se observa que se alcanzan concentraciones mucho más altas, siendo el mes de octubre de 2023 el mes que presenta la mayor concentración en el periodo 2018-2023 con $4.6 \times 10^{-2} \text{ mol/m}^2$ (Figura 22 b).

En Pichincha, en el periodo prepandemia el nivel máximo de concentración de CO se alcanzó en marzo de 2019 siendo el mes que presenta mayor concentración en el periodo 2018-2023 con un $3.6 \times 10^{-2} \text{ mol/m}^2$, el segundo pico de concentración del año 2019 se registró en agosto con $3 \times 10^{-2} \text{ mol/m}^2$, en el periodo de pandemia se observa que el primer pico de concentración se alcanza en el mes de abril de 2020 con $3 \times 10^{-2} \text{ mol/m}^2$, esto significa una reducción de $-6 \times 10^{-2} \text{ mol/m}^2$ respecto al año anterior. En el periodo postpandemia se observa una tendencia a la reducción en las concentraciones, siendo el mes de octubre de 2023 el mes que presenta la mayor concentración de este periodo con $3.3 \times 10^{-2} \text{ mol/m}^2$ (Figura 22 c).

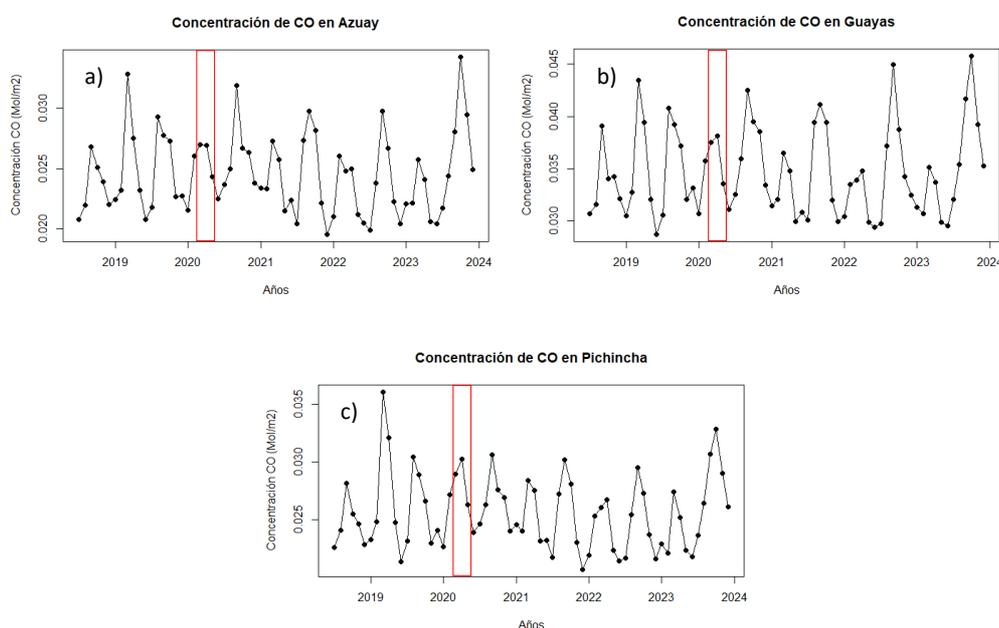


Figura 22. Concentración de CO en Azuay, Guayas y Pichincha. (El recuadro rojo indica el periodo de confinamiento de marzo a mayo del 2020).

5.3. ESTABLECER UNA PROYECCIÓN MEDIANTE UN MODELO MATEMÁTICO DE LOS PUNTOS CRÍTICOS DE CONTAMINACIÓN DE AIRE EN EL ECUADOR PARA ESTABLECER MEDIDAS DE GESTIÓN AMBIENTAL

Patrón de datos faltantes

Para establecer los modelos matemáticos, primero se hizo un análisis de datos faltantes, para determinar el modelo que mejor se adapte a los datos disponibles.

Como muestra la Figura 23, a nivel nacional, hay disponibilidad de datos únicamente para 15 provincias de un total de 24. En un contexto nacional existe un 72.4% de disponibilidad de datos, sin embargo, podemos observar que la disponibilidad de datos no es equitativa para todas las provincias, siendo Pichincha, Santo Domingo de los Tsachilas y Esmeraldas las provincias con menos datos con un 85%, 77% y 54% de faltantes respectivamente.

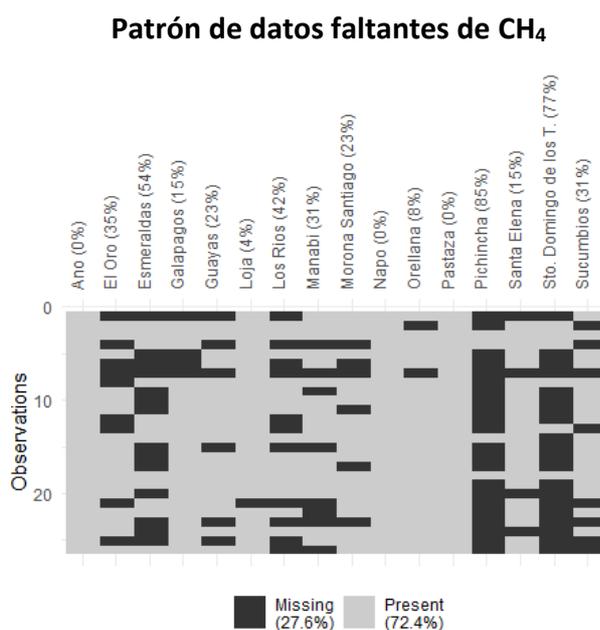


Figura 23. Patrón de datos faltantes de CH₄

Cabe destacar que los datos de CH₄ disponibles no abarcan en totalidad el periodo de tiempo establecido para este estudio. A continuación, se detallan los meses en los que existen datos:

- 2019: abril, agosto, septiembre, octubre.
- 2020: septiembre, noviembre
- 2021: agosto, septiembre, octubre, noviembre
- 2022: enero, mayo, junio, julio, septiembre, octubre, noviembre, diciembre
- 2023: enero, mayo, junio, agosto, septiembre, octubre, diciembre

Debido a que no existen datos para el periodo de pandemia (marzo-mayo 2020), no se pudo hacer un análisis del comportamiento de este contaminante pre-pandemia, pandemia y post-pandemia.

Como muestra la Figura 20 en el caso de SO₂, NO₂ y CO, existe un 100% de disponibilidad de datos de los contaminantes a nivel nacional, es decir que para todas las provincias existe un 100% de datos para el análisis. Para el CO se obtuvo una serie temporal completa desde julio de 2018 hasta el diciembre de 2023, para el SO₂ y NO₂ se obtuvo una serie temporal completa desde noviembre de 2018 hasta diciembre de 2023.

Patrón de datos faltantes de SO₂, NO₂ y CO

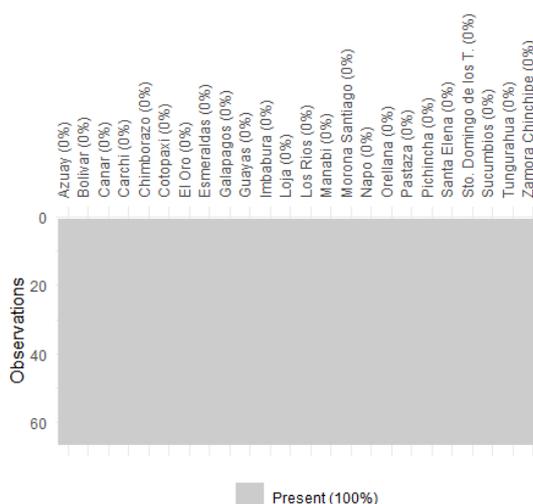


Figura 24. Patrón de datos faltantes de SO₂, NO₂ y CO

Tomando en cuenta la disponibilidad de datos, para los contaminantes SO₂, NO₂ y CO se realizó un modelo ARIMA, que es un modelo para predecir valores futuros tomando en cuenta las series temporales pasadas, es un modelo muy sensible a la cantidad y calidad de datos, por lo que se decide no aplicarlo a los datos de CH₄ por su poca disponibilidad de datos. En el caso de CH₄ se aplicó un modelo de regresión lineal.

Modelo ARIMA

Pronósticos ARIMA CO

Se hizo un pronóstico con el modelo ARIMA para 6 meses, es decir hasta junio de 2024, a partir de los datos extraídos de Google Earth Engine.

La concentración de CO a nivel nacional tiende a disminuir hasta 2.90×10^{-2} mol/m² (Figura 25 a), para luego llegar a una estabilidad aparente para los meses restantes de 2024.

Para las provincias análisis, el caso es similar, en la provincia de Azuay, la concentración de CO tiende a disminuir hasta 2.45×10^{-2} mol/m² (Figura 25 b), en la provincia de Guayas disminuye hasta 3.45×10^{-1} mol/m² (Figura 25 c) y para la provincia de Pichincha disminuye hasta 2.56×10^{-1} mol/m² (Figura 25 d). Adicional a esto, se puede destacar que Guayas es la provincia con mayor concentración de CO de las 3 provincias de estudio.

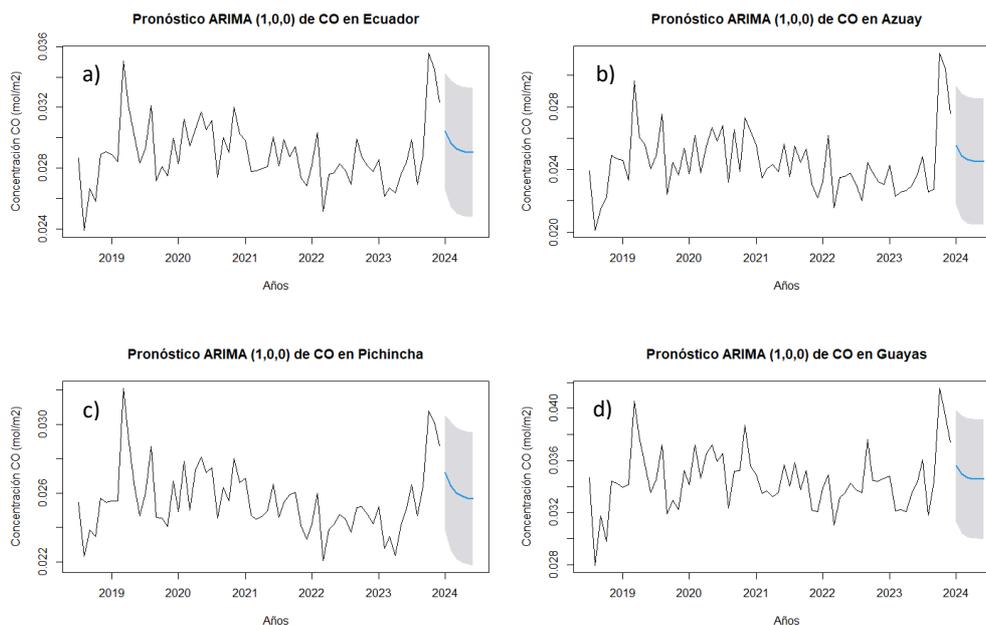


Figura 25. Pronósticos ARIMA de CO en Ecuador, Azuay, Guayas y Pichincha

Pronósticos ARIMA SO₂

Se puede observar que la concentración de SO₂ a nivel nacional tiende a estabilizarse en los 6 meses de la proyección, según el modelo ARIMA aplicado, las concentraciones disminuirán hasta -8.37×10^{-6} mol/m² (Figura 26 a).

Para Azuay, se observa que las concentraciones tienden a elevarse hasta 6.85×10^{-5} mol/m² (Figura 26 b), para estabilizarse en este valor en los siguientes meses. Para la provincia de Guayas, las concentraciones tienen un aumento los dos primeros meses hasta llegar a un valor máximo de 1.7×10^{-4} mol/m² (Figura 26 c), en el mes siguiente tiene una disminución que llega a los 1.1×10^{-4} mol/m², para luego elevarse de nuevo. Para la provincia de Pichincha se observa que la tendencia en las concentraciones de SO₂ es a aumentar, llegando a un valor máximo de 7.40×10^{-5} mol/m² para el mes de junio de 2024 (Figura 26 d).

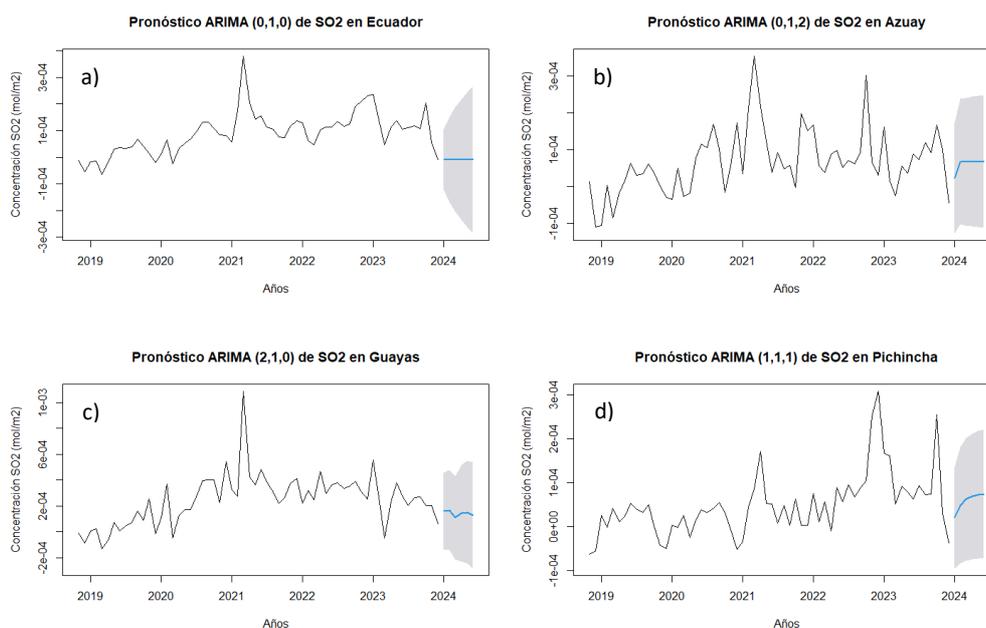


Figura 26. Pronósticos ARIMA de SO₂ en Ecuador, Azuay, Guayas y Pichincha

Las concentraciones de NO₂ a nivel nacional tienden a estabilizarse hasta junio de 2024, con una concentración de 4.04×10^{-5} mol/m² (Figura 27 a).

Para las provincias analizadas, el caso es similar, las concentraciones en las tres provincias tienden a estabilizarse. Para la provincia Azuay, la concentración se estabiliza en un valor de 3.77×10^{-5} mol/m² (Figura 27 b), para la provincia Guayas en un valor de 4.75×10^{-5} mol/m² (Figura 27 c) y para la provincia Pichincha en un valor de 5.04×10^{-5} mol/m² (Figura 23 d).

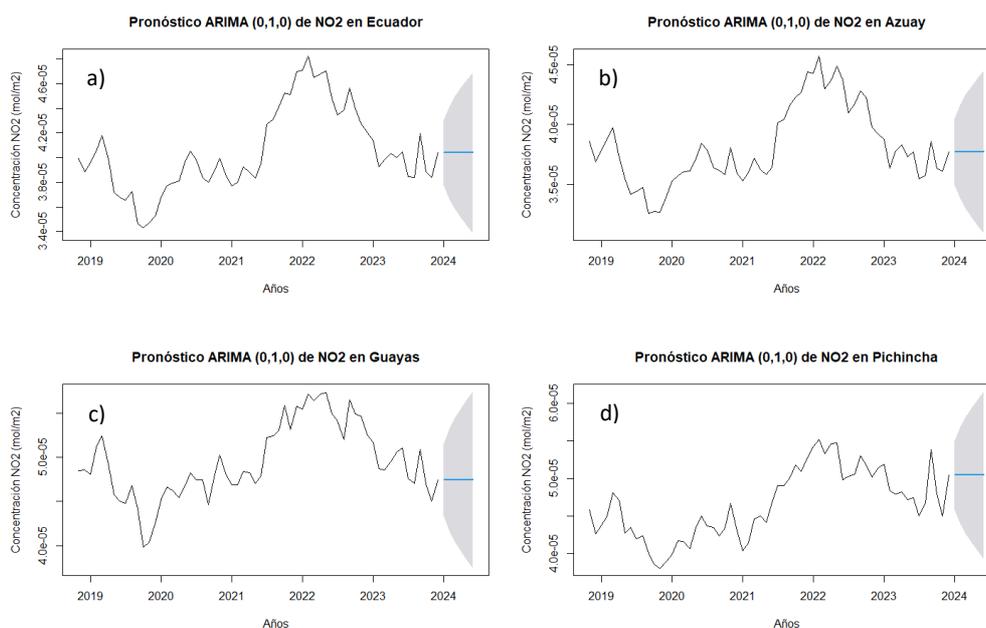


Figura 27. Pronósticos ARIMA de SO₂ en Ecuador, Azuay, Guayas y Pichincha

Pronósticos regresión lineal CH₄

Para hacer la regresión lineal, primero fue necesario asegurarse que los datos tengan correlación, se calculó el coeficiente de Pearson (r), que indica el valor de correlación de las variables de estudio.

Para tener un pronóstico más real, antes de realizar la regresión lineal, se hizo un relleno de datos en los meses en los cuales las provincias a analizar no disponían de datos. En el caso de la provincia Azuay no se realizó el análisis debido a que esta provincia no disponía de ningún dato a lo largo de los años de estudio, por lo que se decidió no tomarla en cuenta para este proceso.

A escala nacional, se obtuvo un coeficiente $r = 0.79$ que indica una correlación alta entre los datos de contaminación. el pronóstico indica un aumento importante en las concentraciones de CH₄ a nivel nacional, llegando a su punto máximo en junio de 2024, con una concentración de 1894.34 Mol fraction (Figura 28 a)

Para la provincia de Guayas, se obtuvo un coeficiente $r = 0.79$ que indica una correlación alta. El pronóstico indica un aumento en las concentraciones de CH₄,

llegando a un 1905.43 Mol fraction (Figura 28 b). Para la provincia de Pichincha, se obtuvo un coeficiente $r = 0.66$ que indica una correlación media-alta. El pronóstico indica un aumento en las concentraciones de CH_4 , llegando a un 1893 Mol fraction (Figura 28 c).

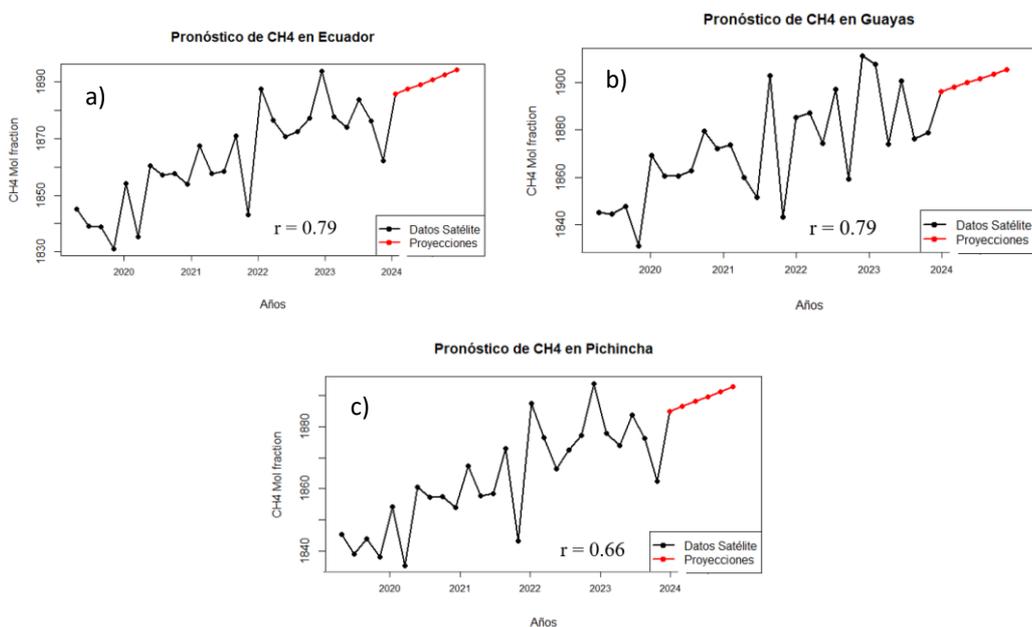


Figura 28. Pronósticos de CH_4 en Ecuador, Guayas y Pichincha (regresión lineal).

6. CONCLUSIONES

- A nivel nacional, las concentraciones de los contaminantes tienen una tendencia a aumentar conforme pasan los años. En el caso del SO_2 . En el periodo prepandemia el valor máximo fue alcanzado en febrero de 2020, con un $9.12 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$, en el periodo pandemia, las concentraciones disminuyeron hasta un $2.33 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$ en mayo de 2020 y en el periodo postpandemia Ecuador alcanzó su valor máximo en marzo de 2021 con un valor de $4.4 \times 10^{-4} \text{ mol/m}^2$. En el caso del NO_2 en el periodo prepandemia el valor máximo fue alcanzado en noviembre del 2018 con un $4.35 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$, en el periodo pandemia, las concentraciones disminuyeron a $3.33 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$ en marzo de 2020 y en el periodo postpandemia se alcanzó la concentración máxima hasta la fecha en el mes de septiembre de 2022, con un $4.94 \times 10^{-5} \text{ mol/m}^2$. En el caso del CO , en el periodo prepandemia, el valor máximo fue alcanzado en marzo de 2019 con un $3.91 \times 10^{-2} \text{ mol/m}^2$, en el periodo pandemia, las concentraciones disminuyeron hasta $2.9 \times 10^{-2} \text{ mol/m}^2$ en mayo de 2020 y en el periodo postpandemia el valor máximo fue alcanzado en octubre de 2023 con una concentración de 0.383 mol/m^2 . En el caso del CH_4 el valor máximo fue registrado en el mes de mayo de 2023 con una concentración de $1893.79 \text{ Mol fraction}$ y el valor más bajo fue registrado en octubre de 2019 con $1831.16 \text{ Mol fraction}$. No se cuenta con los datos suficientes de CH_4 para hacer un análisis del comportamiento del contaminante durante los meses de la pandemia.
- Si se toma en cuenta solamente los meses marzo, abril y mayo de 2019 y se los compara con los datos de los meses marzo, abril y mayo de 2020, todos los contaminantes presentan una aparente disminución en las concentraciones; sin embargo, si analiza los datos con un enfoque anual, es decir tomando en cuenta todos los meses de los años 2019 y 2020, en realidad el único contaminante que presenta disminución en las concentraciones es el NO_2 .
- Analizando los valores de mediana de las concentraciones de los diferentes contaminantes, se puede determinar que: En el caso de CO , Guayas es la provincia que registra mayores concentraciones en los periodos prepandemia,

pandemia y postpandemia, seguida por Pichincha y finalmente Azuay. En este análisis se puede decir que, los niveles de CO durante la pandemia aumentan en un 16.05% en Azuay, 13.91% en Guayas y 17.43% en Pichincha, siendo Pichincha la provincia que más aumentó las concentraciones durante la pandemia, a nivel nacional, se puede evidenciar un aumento del 18.01% en las concentraciones de este contaminante. Los niveles de concentración postpandemia tienden a reducirse en un -11.56% en Azuay, -10.17% en Guayas y en -13.03% en Pichincha y -12.90% a nivel nacional.

- En el caso de NO₂, Guayas es la provincia que registra mayores concentraciones en los periodos prepandemia, pandemia y postpandemia, seguida por Pichincha y finalmente Azuay, los niveles de NO₂ durante la pandemia disminuyeron en un -7.03% en Azuay, -11.33% en Guayas y un -15.50% en Pichincha, siendo Pichincha la provincia que presenta la mayor disminución en las concentraciones durante la pandemia, a nivel nacional se evidencia una reducción del -6.44% en las concentraciones de este contaminante. Los niveles de concentración postpandemia tienden a elevarse en un 20.80% en Azuay, 29.86% en Guayas, 38.01% en Pichincha y un 20.92% a nivel nacional.
- En el caso de SO₂, Guayas es la provincia que registra mayores concentraciones en los periodos prepandemia, pandemia y postpandemia, seguida por Azuay y finalmente Pichincha, los niveles de SO₂ durante la pandemia aumentaron en un 30.84% en Azuay, 38.66% en Guayas y disminuyeron un -79.59% en Pichincha, siendo Guayas la provincia que presenta la mayor disminución en las concentraciones durante la pandemia, a nivel nacional se evidencia un aumento del 37.99% en las concentraciones de este contaminante. Los niveles de concentración postpandemia tienden a elevarse en un 93.72% en Azuay, 212.10% en Guayas, 1154.44% en Pichincha y un 216.29% a nivel nacional.
- Debido a la poca disponibilidad de datos de CH₄, no es posible hacer un análisis completo del contaminante en el periodo prepandemia, postpandemia y pandemia, por lo tanto, se hizo un análisis en el periodo 2019, 2020 y 2021-2023 para hacer comparaciones. Cabe resaltar que para el caso de la provincia Azuay, la disponibilidad de datos fue nula, por lo que se la excluyó de este análisis. En el caso de CH₄, Guayas es la provincia que registra mayores concentraciones en el

periodo 2019, 2020 y 2021-2023, seguida por Pichincha, los niveles de CH₄ durante la 2020 aumentaron en un 1.09% en Guayas, 0.18% en Pichincha y 0.32% a nivel nacional, siendo Guayas la provincia que presenta el mayor aumento en las concentraciones durante este año. Los niveles de concentración postpandemia tienden a elevarse en un 0.56% en Guayas, 1.36% en Pichincha y un 1.42% a nivel nacional.

- Si bien la pandemia contribuyó a la relativa reducción en las concentraciones de los diferentes contaminantes estudiados, esta reducción es poco influyente cuando analizamos los datos en un contexto anual, debido a que los 3 meses en los que se redujo la concentración son poco significantes para los demás 9 meses en los que las concentraciones siguieron su tendencia de aumento normal. Las normas restrictivas fueron de gran influencia para que se den estas reducciones en las concentraciones de los contaminantes, pero lamentablemente esto funcionó porque fueron normas de cumplimiento obligatorio para la mayor parte de la sociedad. Es evidente que para que haya una influencia real y sostenible en el tiempo, es la sociedad la que debe generar conciencia de sus hábitos de consumo y de movilización.

REFERENCIAS

- Ackerman, S., & Knox, J. (2007). *Meteorology : understanding the atmosphere* ((CA: Thoms).
- Admassu, M., & Wubeshet, M. (2014). Evolution of cities and territories in Air Air Pollution. *Built Environment*, 40(1), 85–100.
- Alvarez-Mendoza, C. I. (2023). The Use of Remote Sensing in Air Pollution Control and Public Health. 139–157. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22680-9_7
- Alvarez-Mendoza, C. I., Teodoro, A., & Ramirez-Cando, L. (2019). Spatial estimation of surface ozone concentrations in Quito Ecuador with remote sensing data, air pollution measurements and meteorological variables. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(3). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7286-6>
- Alvarez, C. I. (2014). Estimación De Contaminación Del Aire Por Pm10 En Quito Determinado Por Indices Ambientales Obtenidos Con Imágenes Satelitales Landsat Etm+. *Vicerrectorado de Investigación y Vinculación Con La Colectivida*, 53, 104. <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/8675/1/T-ESPE-047962.pdf>
- Atiaga, O., Guerrero, F., Páez, F., Castro, R., Collahuazo, E., Nunes, L. M., Grijalva, M., Grijalva, I., & Otero, X. L. (2023). Assessment of variations in air quality in cities of Ecuador in relation to the lockdown due to the COVID-19 pandemic. *Heliyon*, 9(6). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17033>
- ESA. (2023). S5P Mission Performance Centre Sulphur Dioxide [L2__SO₂____] .
- Eskes, H., van Geffen, J., Boersma, F., Eichmann, K.-U., Apituley, A., Pedergnana, M., Sneep, M., Veeffkind, J. P., & Loyola, D. (2021). Sentinel-5 precursor / TROPOMI Level 2 Product User Nitrogen Dioxide. 4.1.0, 128. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-5p/>
- FLACSO, MAE, & PNUMA. (2008). *Geo Ecuador*. 105. <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/41444.pdf>
- Fundación Natura. (2000). “Incremento de enfermedades respiratorias en escolares de Quito por contaminación atmosférica de origen vehicular: informe final.

- García, A. (2000). LANDSAT. 2–40.
- González, B., Monroy, R., Ochoa, L., & Oviedo, B. (2022). Carbon monoxide (CO) levels after COVID-19 pandemic in Ecuador. *NeuroQuantology*, 20(8), 6581–6587. <https://doi.org/10.14704/nq.2022.20.8.NQ44682>
- Guerrero García, F. M. (2021). Análisis de la variación en la calidad de aire debido al confinamiento por COVID-19 en el Ecuador continental. 6.
- Heilig, G. K. (1994). The greenhouse gas methane (CH₄): Sources and sinks, the impact of population growth, possible interventions. *Population and Environment*, 16(2), 109–137. <https://doi.org/10.1007/BF02208779>
- INEC. (2010). Resultados del Censo 2010 de población y vivienda en el Ecuador. Fascículo Provincial Pichincha, 0–7.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2015). Remote sensing and image interpretation. In *Australian Journal of Geodesy, Photogrammetry & Surveying* (7th editio, Vol. 39). Wiley. <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-remote-sensing-and-image-interpretation.pdf>
- Ministerio de Salud Pública. (2016). Ministerio de Salud Pública. Municipios Saludables Respiran Vida. <https://www.salud.gob.ec/municipios-saludables-respiran-vida/#:~:text=El Ministerio de Salud Pública,población conforme a sus competencias.>
- NASA Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center. (s. f.). Índice de Aerosoles. NASA. Recuperado el 26 de mayo de 2024, de <https://disc.gsfc.nasa.gov/information/glossary?title=Aerosol%20Index>
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. 854.
- Onursal, B., & Gautam, S. P. (1984). Contaminantes del aire y sus efectos. *Paper*, 2(1), 43. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/001083/Course2/Lecturas/Vehiculos/chapter2.pdf>
- Pacheco, H., Díaz-López, S., Jarre, E., Pacheco, H., Méndez, W., & Zamora-Ledezma, E. (2020). NO₂ levels after the COVID-19 lockdown in Ecuador: A trade-off between environment and human health. *Urban Climate*, 34(2), 100674.

<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100674>

- Pénard-Morand, C., & Annesi-Maesano, I. (2004). Air pollution: from sources of emissions to health effects. *Epidemiology of Allergic and Respiratory Diseases (EPAR)*, 375–394. https://doi.org/10.1142/9789814366984_0022
- Peng, S., Lin, X., Thompson, R. L., Xi, Y., Liu, G., Hauglustaine, D., Lan, X., Poulter, B., Ramonet, M., Saunois, M., Yin, Y., Zhang, Z., Zheng, B., & Ciais, P. (2022). Wetland emission and atmospheric sink changes explain methane growth in 2020. *Nature*, 612(7940), 477–482. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05447-w>
- Quito como vamos. (2022). Informe de calidad de vida 2022. 1–62.
- Rice, M., Balmes, J., Malhotra, A., Castner, J., Garcia, E., Hicks, A., Shankar, H., & Sockrider, M. (2021). Outdoor air pollution and your health. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 204(7), P13–P14. <https://doi.org/10.1164/rccm.2046P13>
- Secretaría de Gestión de Riesgos. (2021). Informe de Situación No. 27 por Actividad Volcánica Sangay. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2021/05/SITREP-27-AVO-Sangay-31052021.pdf>
- Sarla, G. S. (2020). Air pollution : Health effects. *Scielo*, 37(1), 33–38.
- Singh, H. G. (1995). Composition, chemistry, and climate of the atmosphere. *Composition, Chemistry, and Climate of the Atmosphere*. [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(96\)00207-5](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(96)00207-5)
- Solórzano Villegas, J. V., & Perilla Suárez, G. A. (2022). Cómo usar Google earth engine (y sobrevivir).
- Sonwani, S., & Saxena, P. (2021). Identifying the Sources of Primary Air Pollutants and their Impact on Environmental Health: A Review. October 2016. www.science24.org
- UNICEF. (2019). El aire que respiramos. Los Efectos de La Contaminación Del Aire y Del Cambio Climático En La Salud de La Niñez En El Ecuador, 1–35. www.unicef.org/ecuador
- 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>

Vinueza, C. (2018). ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LOS PUNTOS DE MONITOREO DE LA SECRETARÍA DEL AMBIENTE, UBICADOS DENTRO DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO EN EL PERIODO 2005 – 2017. <http://www.tfd.org.tw/opencms/english/about/background.html><http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.001><http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2016.12.055><https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.02.006><https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.04.024>

WHO. (2022). Air pollution. In: *Compendium of WHO and other UN guidance on health and environment, 2022 update*. Geneva: World Health Organization; (WHO/HEP/ECH/EHD/22.01). WHO Fact Sheet, 2019(December), 5. <https://www.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/arsenic>

ANEXOS

Anexo 1. Código de Java Script para descarga de datos promedio mensuales de cada provincia dentro del área de interés

En miniconda escribir:

- Conda actívale gee
- Jupyter lab

Una vez en Jupyter notebook:

```
import ee
import geemap
import os

# Inicializar GEE
ee.Initialize()

# Cargar la imagen promedio del satélite TROPOMI CO OFL para el año 2018
tropomi = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_CO') \
    .filterDate('2021-01-01', '2021-01-31') \
    .mean()

# Cargar los límites administrativos de las provincias de Ecuador
provincias = ee.FeatureCollection("FAO/GAUL/2015/level1").filter(ee.Filter.eq('ADMO_NAME',
'Ecuador'))

# Directorio de salida para los archivos CSV
out_dir = os.path.join(os.path.expanduser('~'), 'Downloads')
if not os.path.exists(out_dir):
    os.makedirs(out_dir)

# Calcular estadísticas zonales para TROPOMI CO OFL en las provincias de Ecuador
out_tropomi_stats = os.path.join(out_dir, 'tropomi_stats.csv')
geemap.zonal_stats(tropomi, provincias, out_tropomi_stats, stat_type='MEAN',
scale=1000)

# Crear enlace de descarga para el archivo CSV de estadísticas de TROPOMI CO OFL
geemap.create_download_link(out_tropomi_stats)
```

Anexo 2. Código de RStudio para modelo ARIMA (Cerón, 2023)

```
#####
##### MODELO ARIMA PARA CO#####
#####
#install.packages("mice")
#install.packages("naniar")
install.packages("forecast", "tseries", "TSA", "urca")
library(mice)
library(readxl)
library(naniar)
library(forecast)# Contiene el modelo ARIMA
library(tseries) #Para series de tiempo
library(TSA) #Para series de tiempo
library(urca) #Para hacer el Test de Raiz Unitaria (detectar hay o no estacionariedad)
library(ggplot2) #Para hacer gráficos
library(dplyr) #Para la manipulación de datos (filtrar, seleccionar, agregar, transformar)
library(stats) #Se usa para diversas pruebas estadísticas (medias,varianza, arima,etc)
library(seasonal)#Para calcular la serie ajustada de estacionalidad
datos<- readxl::read_xlsx("CO.xlsx")
#md.pattern(datos, rotate.names=TRUE)
## GRAFICAR MISSING DATA##
vis_miss(datos)
#####
###MODELO ARIMA####
#####
#Declarar serie de tiempo
CO<-ts(datos$Azuay[1:66], frequency=12, start=c(2018,7))
#Graficar las series de tiempo y análisis exploratorio general de la serie
autoplot(CO,frequency=12,xlab="Años",ylab="Concentracion",main="Concentración
Azuay de CO 2018-2023")
#EXTRACCIÓN DE SEÑALES
```

#1. Graficar los datos, analizar patrones y observaciones atípicas. Apoye su análisis con una descomposición o extracción de señales.

```
CO_decomp<- decompose(CO)
# Graficar los componentes
#Concentracion CO
par(mfrow = c(2, 2)) #Se utiliza para dividir la ventana gráfica en una matriz de 2 filas y
2 columnas
plot(CO_decomp$x, main = "Concentración de CO", col = "black", ylab =
"concentración")
plot(CO_decomp$trend, main = "Tendencia", col = "blue", ylab = "Valores")
plot(CO_decomp$seasonal, main = "Estacionalidad", col = "red", ylab = "Valores")
plot(CO_decomp$random, main = "Irregularidad", col = "green", ylab = "Valores")
#APLICACIÓN DEL MODELO ARIMA#
###PASO 1:IDENTIFICACIÓN##
###1. Validamos estacionariedad de las series##
###TEST de Dickey Fuller##
#Cargar el paquete tseries
library(tseries)
# Realizar prueba de raíz unitaria
adf.test(CO)
##Tras realizar la prueba aumentada de Dickey-Fuller (ADF), obtenemos un p-valor =
0.19. Como el p-valor > 0.05
##Podemos concluir que el IPIR es una variable NO Estacionaria.
##para validar si la estacionalidad es un factor importante en esta variable##
#Para hacer este proceso se usa la librería seasonal instalada y cargada previamente.
#Colocamos el nombre a la nueva variable: CO_SA (serie ajustada por estacionalidad)
CO_SA <- seasadj(CO_decomp)
# Graficar la serie de tiempo original y desestacionalizada en un mismo gráfico
plot(CO, main = "Figura 3. CO- original (negro) y desestacionalizada (rojo)")
lines(CO_SA, col = "red")
legend( legend = c("Serie original", "Serie desestacionalizada"), col = c("black", "red"),
lty = 1)
```

```

#Diferencias en dos niveles
COsa_d1= diff(CO, differences = 1)
COsa_d2= diff(CO, differences = 2)
plot(COSA_d1, main = "Figura 4. CO- Diferenciación en (niveles)")
lines(COSA_d2, col = "red")
legend("topleft", legend = c(" Una diferencia", "Dos diferencias"), col = c("black", "red"),
lty = 1)
## Realizar prueba de raíz unitaria
adf.test(COSA_d1)
#Determinar p y q
# La función de autocorrelación (ACF): mide la correlación entre una serie de tiempo y
sus valores retrasados. Para determinar el valor de q en un modelo ARIMA, se puede
mirar el gráfico ACF y buscar el primer retraso que tiene una correlación significativa (es
decir en donde se sobrepasen las líneas punteadas. Este valor corresponderá a q (MA=1
O 2 o 3 o....q valor)
# # RecomendaciónPara iniciar a plantear los modelos, se puede partir de un modelo
con AR(0) Ó MA(0).
Acf(COSA_d1, main='Figura 5.Función de autocorrelación (ACF) -CO diferenciado')
Pacf(COSA_d1, main='Figura 6.Función de autocorrelación parcial (PACF) -CO
diferenciado')
# PASO 2: ESTIMACIÓN DE LOS POSIBLES MODELOS
# # Recordar: Aquí la forma del modelo ARIMA es (p,d,q)
# #De acuerdo con lo observado en el paso 1, podemos probar los siguientes 6 modelos:
# Model1= (0,1,1) Model2= (0,1,2) Model3= (1,1,1) Model4= (1,1,2) Model5= (2,1,1)
Model6= (2,1,2)
#Corremos la función auto.arima:
auto.arima(CO_SA)
# PASO 3:VALIDACIÓN
# # Analizamos que los residuos sean Ruido Blanco (los residuos se distribuyen
normalmente y no hay autocorrelación entre ellos).
# # Con la prueba de Ljung-Box, se evalúa si hay o no autocorrelación en los residuos:
# Model2=Arima(CO_SA,order = c(1,0,0))

```

```
Box.test(Model2$residuals, lag = 20, type = "Ljung-Box")
#Como el P-value (0.1854) es mayor a 0.05 no se rechaza H0. En ese caso si se cumple
la condición de los residuos, son ruido blanco (no se correlacionan los errores).
# PRUEBA DE SHAPIRO WILK
shapiro.test(Model2$residuals)
##
## PRONOSTICO
#Se hace pronpostico a 3 y 06 meses. Se elije el parametro c(95) para que sea a un nivel
de confianza del 95%
Pronostico3=forecast(Model2,level= c(95), h=3)
plot(Pronostico3)
Pronostico3
Pronostico6=forecast(Model2,level= c(95), h=6)
plot(Pronostico6)
Pronostico6
```

Anexo 3. Datos CO obtenidos del Sentinel 5p-TROPOMI

Mes	Pichincha	Guayas	Azuay	Nacional
jul-18	0.02260585	0.0306807	0.02080949	0.02506038
ago-18	0.02405782	0.03156632	0.02195102	0.02650065
sep-18	0.02816807	0.03908402	0.02681428	0.03217538
oct-18	0.02549359	0.03400389	0.0251156	0.02861366
nov-18	0.02461558	0.03424112	0.02395582	0.02788488
dic-18	0.0228346	0.03211572	0.02203743	0.02621488
ene-19	0.0232322	0.03045304	0.02243457	0.02634679
feb-19	0.02480135	0.03269956	0.02319077	0.02817452
mar-19	0.03604022	0.04343685	0.03288441	0.039184
abr-19	0.03210152	0.03941854	0.02752535	0.03420117
may-19	0.02472024	0.0320751	0.02324347	0.02748748
jun-19	0.02133359	0.02872942	0.02079027	0.02417309
jul-19	0.02314357	0.03057471	0.02179422	0.02571343
ago-19	0.03042601	0.04080226	0.02932236	0.03470547
sep-19	0.02887022	0.03922621	0.02775619	0.0327081
oct-19	0.02658812	0.03715138	0.02730996	0.03091406
nov-19	0.0229465	0.03207551	0.02268792	0.02647115
dic-19	0.02406774	0.03311897	0.02271807	0.02710695
ene-20	0.02262402	0.03065696	0.02155225	0.0257745
feb-20	0.02712522	0.03572154	0.02606512	0.03095704
mar-20	0.02896694	0.03748671	0.02701094	0.03357712
abr-20	0.03021271	0.03812565	0.02694371	0.0326724
may-20	0.02628925	0.03357895	0.02432684	0.02897832
jun-20	0.023849	0.03110294	0.02253194	0.02639081
jul-20	0.02463571	0.03251395	0.02370484	0.02753599
ago-20	0.02627593	0.03595801	0.02501633	0.02998436
sep-20	0.03060943	0.04253221	0.03188595	0.03555825
oct-20	0.02755523	0.03947578	0.0267309	0.0318457
nov-20	0.02692011	0.03852959	0.02635773	0.03101
dic-20	0.0239963	0.03340513	0.02380949	0.02740698
ene-21	0.0245601	0.03145776	0.02337408	0.0272807
feb-21	0.02398286	0.0320667	0.02335139	0.02750063
mar-21	0.0283997	0.03648962	0.02730206	0.03194627
abr-21	0.02749777	0.03481362	0.02575449	0.03004787
may-21	0.02315741	0.02991875	0.02148902	0.02538456
jun-21	0.02318545	0.03081741	0.02236636	0.02592704
jul-21	0.02173457	0.03003818	0.02042338	0.02456924
ago-21	0.02718477	0.03942806	0.02733182	0.03246727

sep-21	0.03020231	0.04110584	0.02978054	0.03427644
oct-21	0.02804926	0.03944346	0.02818276	0.03219304
nov-21	0.023011	0.03199015	0.02213746	0.02632459
dic-21	0.02068784	0.02994794	0.01957506	0.02399961
ene-22	0.02188785	0.03040771	0.02101939	0.02568261
feb-22	0.02528841	0.03347689	0.02605246	0.03008706
mar-22	0.02601822	0.03390353	0.02481673	0.02931138
abr-22	0.02671685	0.03476469	0.02497374	0.02967843
may-22	0.02236457	0.029881	0.02121228	0.02497141
jun-22	0.02140503	0.02941146	0.02048585	0.02413263
jul-22	0.0216513	0.02975789	0.01993409	0.02430351
ago-22	0.02543581	0.03716278	0.02382779	0.02952947
sep-22	0.02948706	0.04496038	0.02980428	0.03546349
oct-22	0.02725552	0.03871051	0.02668423	0.03157274
nov-22	0.02367456	0.03423206	0.02228014	0.02713649
dic-22	0.0216155	0.03246772	0.0204381	0.024917
ene-23	0.02290931	0.03131102	0.02207995	0.02604411
feb-23	0.02205886	0.03066795	0.02217459	0.02587615
mar-23	0.02741547	0.03512064	0.02578463	0.03081791
abr-23	0.02519217	0.03367472	0.02411845	0.02845747
may-23	0.02232474	0.02988854	0.02058953	0.02486995
jun-23	0.02179787	0.02952892	0.02046209	0.02427141
jul-23	0.02364987	0.03204343	0.02171956	0.02630292
ago-23	0.02640548	0.03540842	0.02437841	0.02949995
sep-23	0.03069995	0.0416752	0.0280881	0.03435548
oct-23	0.03280779	0.04576552	0.03426823	0.03836163
nov-23	0.02900162	0.03925363	0.02949439	0.03348689
dic-23	0.02612216	0.03526144	0.02492674	0.02947946

Anexo 4. Datos NO₂ obtenidos del Sentinel 5p-TROPOMI

Mes	Pichincha	Guayas	Azuay	Nacional
nov-18	5.0628E-05	5.4515E-05	4.2E-05	4.35772E-05
dic-18	4.4576E-05	5.1828E-05	3.7801E-05	3.99195E-05
ene-19	4.1076E-05	4.3432E-05	3.4623E-05	3.61745E-05
feb-19	4.0844E-05	4.4509E-05	3.4527E-05	3.57752E-05
mar-19	4.2218E-05	4.5408E-05	3.5604E-05	3.72603E-05
abr-19	4.2528E-05	4.4059E-05	3.3829E-05	3.6491E-05
may-19	4.1117E-05	4.3394E-05	3.4408E-05	3.58745E-05
jun-19	4.3754E-05	4.3896E-05	3.4597E-05	3.6956E-05
jul-19	4.3492E-05	4.5408E-05	3.6085E-05	3.81665E-05
ago-19	4.5001E-05	5.0352E-05	3.7744E-05	4.05284E-05
sep-19	4.3068E-05	5.0945E-05	3.5534E-05	3.84329E-05
oct-19	4.3048E-05	4.6607E-05	3.6215E-05	3.81898E-05
nov-19	4.2871E-05	4.6403E-05	3.6061E-05	3.82968E-05
dic-19	4.0928E-05	4.5883E-05	3.4873E-05	3.634E-05
ene-20	3.7223E-05	4.0641E-05	3.2017E-05	3.33647E-05
feb-20	3.7539E-05	3.998E-05	3.1463E-05	3.29472E-05
mar-20	3.5751E-05	3.9281E-05	3.1923E-05	3.33452E-05
abr-20	3.6083E-05	4.0265E-05	3.2728E-05	3.47183E-05
may-20	4.1801E-05	4.4379E-05	3.6016E-05	3.83216E-05
jun-20	4.5303E-05	4.712E-05	3.8859E-05	4.06847E-05
jul-20	4.5118E-05	4.8074E-05	3.9562E-05	4.14888E-05
ago-20	4.6129E-05	5.0966E-05	3.9406E-05	4.16659E-05
sep-20	4.5283E-05	5.1356E-05	3.9162E-05	4.17436E-05
oct-20	4.7821E-05	5.451E-05	3.9283E-05	4.27138E-05
nov-20	5.1542E-05	5.6303E-05	4.1462E-05	4.35683E-05
dic-20	4.4984E-05	5.1284E-05	3.6835E-05	3.96035E-05
ene-21	3.7687E-05	4.2219E-05	3.2026E-05	3.42852E-05
feb-21	3.7296E-05	4.0295E-05	3.1757E-05	3.32427E-05
mar-21	3.8783E-05	4.1455E-05	3.3072E-05	3.46888E-05
abr-21	4.0489E-05	4.306E-05	3.2849E-05	3.53924E-05
may-21	4.2513E-05	4.4651E-05	3.4762E-05	3.70426E-05
jun-21	4.7006E-05	4.6838E-05	3.6884E-05	3.97227E-05
jul-21	5.0492E-05	5.2881E-05	4.1772E-05	4.43695E-05
ago-21	5.1649E-05	5.597E-05	4.3457E-05	4.64324E-05
sep-21	5.3038E-05	5.9735E-05	4.4589E-05	4.79307E-05
oct-21	5.6199E-05	6.2727E-05	4.5772E-05	4.91113E-05
nov-21	5.5724E-05	5.9186E-05	4.6077E-05	4.87393E-05
dic-21	5.4787E-05	5.9051E-05	4.5292E-05	4.80757E-05
ene-22	5.1576E-05	5.0818E-05	4.0992E-05	4.36436E-05
feb-22	5.1065E-05	5.0562E-05	4.1449E-05	4.34806E-05
mar-22	4.7439E-05	4.9495E-05	3.8872E-05	4.19505E-05
abr-22	5.0051E-05	5.2033E-05	4.0273E-05	4.34064E-05

may-22	5.3099E-05	5.4953E-05	4.3785E-05	4.57158E-05
jun-22	5.0051E-05	5.392E-05	4.4172E-05	4.50481E-05
jul-22	5.1736E-05	5.473E-05	4.2601E-05	4.51196E-05
ago-22	5.3158E-05	5.5585E-05	4.4713E-05	4.71524E-05
sep-22	5.5915E-05	6.3204E-05	4.5823E-05	4.94234E-05
oct-22	5.6204E-05	6.1711E-05	4.5788E-05	4.78538E-05
nov-22	5.4964E-05	6.0728E-05	4.3187E-05	4.63687E-05
dic-22	5.3371E-05	5.5803E-05	4.0085E-05	4.30893E-05
ene-23	4.9162E-05	4.7087E-05	3.5471E-05	3.79615E-05
feb-23	4.4245E-05	4.2134E-05	3.2083E-05	3.44868E-05
mar-23	4.2003E-05	4.1554E-05	3.3612E-05	3.52967E-05
abr-23	4.3707E-05	4.4363E-05	3.4922E-05	3.69346E-05
may-23	4.5549E-05	4.8226E-05	3.6225E-05	3.8692E-05
jun-23	4.7663E-05	4.992E-05	3.8165E-05	4.066E-05
jul-23	4.6489E-05	4.8183E-05	3.714E-05	4.01102E-05
ago-23	4.9294E-05	5.0559E-05	3.8777E-05	4.16803E-05
sep-23	5.6781E-05	5.7626E-05	4.1613E-05	4.57484E-05
oct-23	5.2388E-05	5.3779E-05	3.9845E-05	4.26949E-05
nov-23	4.9799E-05	5.109E-05	3.9537E-05	4.19817E-05
dic-23	5.2403E-05	5.0713E-05	3.8644E-05	4.148E-05

Anexo 5. DATOS SO₂ obtenidos del Sentinel 5p-TROPOMI

Mes	Pichincha	Guayas	Azuay	Nacional
nov-18	-5.5019E-06	-3.5891E-05	2.96225E-05	1.1E-05
dic-18	1.3488E-05	-4.9617E-05	-1.5699E-05	-1.123E-05
ene-19	2.5801E-05	-9.4644E-06	-2.5335E-05	1.2456E-06
feb-19	2.6003E-05	2.5907E-05	-1.6051E-05	1.0688E-05
mar-19	2.4098E-05	-2.1843E-05	-1.9704E-05	-8.80E-06
abr-19	3.5514E-05	-5.4208E-05	-2.0547E-05	-1.9418E-05
may-19	5.8146E-06	-6.7525E-06	-1.065E-05	1.5837E-06
jun-19	2.4028E-05	3.8376E-05	3.52738E-05	2.3856E-05
jul-19	6.8002E-06	4.4223E-05	-6.2725E-05	-7.9916E-06
ago-19	1.1115E-06	4.7137E-05	-5.2225E-06	6.7508E-06
sep-19	2.1165E-05	0.00012867	9.24112E-06	3.2493E-05
oct-19	-1.304E-05	9.1101E-05	5.09798E-05	2.469E-05
nov-19	1.5267E-05	0.00022576	1.81291E-05	3.755E-05
dic-19	1.8244E-05	2.4476E-05	6.53424E-05	2.2294E-05
ene-20	2.0888E-06	9.1447E-05	4.61815E-05	2.9055E-05
feb-20	2.5366E-05	0.00036973	2.96242E-05	9.1218E-05
mar-20	6.9364E-06	5.6418E-05	3.75313E-05	3.3461E-05
abr-20	1.1065E-06	0.00013551	-2.0047E-05	3.1842E-05
may-20	-4.1348E-06	9.5842E-05	4.73812E-05	2.3355E-05
jun-20	8.1573E-06	0.00020372	8.74703E-05	5.7234E-05
jul-20	-2.4259E-07	0.00026867	1.33036E-05	5.4506E-05
ago-20	1.0495E-05	0.00036902	0.000130111	9.8487E-05
sep-20	2.647E-05	0.00037315	5.05164E-05	9.4719E-05
oct-20	1.8512E-05	0.00039938	-8.5605E-07	9.0254E-05
nov-20	5.0446E-05	0.00019782	7.24648E-05	0.00010789
dic-20	1.5488E-05	0.00057962	0.000266604	0.00012585
ene-21	-3.4056E-05	0.00030457	0.000113923	7.549E-05
feb-21	7.1513E-05	0.00028015	0.000190698	0.00020116
mar-21	6.776E-05	0.0011918	0.00041855	0.00043646
abr-21	0.00019586	0.00043219	0.000214571	0.00020171
may-21	3.5961E-05	0.00028574	9.37627E-05	0.00011376
jun-21	2.1361E-05	0.00051599	1.06084E-05	0.00014363
jul-21	-2.5113E-05	0.00038375	-4.8368E-07	7.3166E-05
ago-21	1.7953E-05	0.00028447	9.23381E-06	7.0943E-05
sep-21	-2.5207E-05	0.00018821	4.65886E-06	4.0507E-05
oct-21	4.9584E-05	0.00026666	1.15767E-05	5.6847E-05
nov-21	6.1498E-05	0.0003484	0.000215296	0.00013918
dic-21	7.0685E-05	0.00045266	0.000245539	0.00018061
ene-22	7.5151E-05	0.000205	0.000247842	0.00014828
feb-22	3.8197E-05	0.0003228	3.53908E-05	8.7629E-05
mar-22	3.7721E-05	0.00035717	0.00010384	0.00010384
abr-22	1.4659E-05	0.00047528	8.48654E-05	0.00010071

may-22	7.0532E-05	0.00021789	6.9231E-05	8.4668E-05
jun-22	2.7044E-05	0.00039579	2.37862E-05	0.00010177
jul-22	6.2749E-05	0.00037581	-2.2629E-05	9.3629E-05
ago-22	3.6721E-05	0.00031195	2.21994E-05	8.1786E-05
sep-22	6.035E-05	0.00031994	4.12354E-05	8.8184E-05
oct-22	9.1909E-05	0.00038846	0.000316345	0.00017339
nov-22	0.00031005	0.00028639	8.40932E-05	0.00023185
dic-22	0.00037589	0.00029068	0.000124555	0.00027323
ene-23	0.00016678	0.00053917	0.000240457	0.00025415
feb-23	0.00018906	0.00026473	-4.6123E-06	0.00016464
mar-23	3.3659E-05	5.9996E-05	4.01317E-05	0.00010288
abr-23	0.0001174	0.00023857	5.32035E-05	0.00011022
may-23	6.0768E-05	0.00029912	7.73609E-06	0.0001088
jun-23	3.2767E-05	0.00030908	6.04224E-05	9.4199E-05
jul-23	6.0684E-05	0.00020404	-2.021E-05	7.0129E-05
ago-23	4.1556E-05	0.00023804	8.04013E-05	8.6541E-05
sep-23	4.5917E-05	0.00023937	4.05444E-05	7.1266E-05
oct-23	0.00024244	0.00020367	0.000180857	0.00018703
nov-23	8.8588E-05	0.00017735	0.000115604	7.9497E-05
dic-23	3.035E-05	9.9081E-05	5.03991E-05	3.4875E-05

Anexo 6. Datos CH₄ obtenidos del Sentinel 5p-TROPOMI

Mes	Pichincha	Guayas	Nacional
abr-2019	1845.18398	1845.18398	1845.18398
ago-2019	1839.00148	1844.45923	1839.00148
sep-2019	1843.94277	1847.72634	1838.90875
oct-2019	1837.94753	1831.15675	1831.15675
sep-2020	1854.22225	1869.12308	1854.22225
nov-2020	1835.28711	1860.56731	1835.28711
ene-2021	1860.4839	1860.4839	1860.4839
ago-2021	1857.26466	1862.70305	1857.26466
sep-2021	1857.58989	1879.41047	1857.58989
oct-2021	1853.895	1872.25096	1853.895
nov-2021	1867.3714	1873.74638	1867.3714
ene-2022	1857.79851	1859.7707	1857.79851
may-2022	1858.52911	1851.49072	1858.52911
jun-2022	1873.02087	1902.83609	1871.05283
jul-2022	1843.15149	1843.15149	1843.15149
sep-2022	1887.43812	1885.24993	1887.43812
oct-2022	1876.52416	1887.18847	1876.52416
nov-2022	1866.37293	1874.19037	1870.71309
dic-2022	1872.46228	1897.198	1872.46228
ene-2023	1877.15101	1859.22208	1877.15101
may-2023	1893.79186	1911.16723	1893.79186
jun-2023	1877.87873	1907.54379	1877.87873
ago-2023	1873.88427	1873.88427	1873.88427
sep-2023	1883.73545	1900.69697	1883.73545
oct-2023	1876.23477	1876.23477	1876.23477
dic-2023	1862.31475	1878.78873	1862.31475