



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Análisis de la variación en la calidad del aire debido al confinamiento por
COVID-19 en el Ecuador Continental**

Guerrero García, Fernanda Mishell

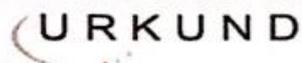
Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniera Geógrafa y del
Medio Ambiente

Dra. Atiaga Franco, Oliva Lucia

14 de marzo de 2021



Urkund Analysis Result

Analysed Document: TESIS_FERNANDA GUERRERO_3-18-2021..docx (D98792606)
Submitted: 3/18/2021 5:31:00 PM
Submitted By: wojacome@espe.edu.ec
Significance: 4 %

Sources included in the report:

Tesis VC version 1 URKUND.docx (D45294754)
 TESIS_CONTAMINACIÓN_13_mayo_2019.docx (D52097324)
 1708_BURGOS_COPO_DEBER#8.docx (D26207774)
 TESIS AM JS URKUND.docx (D96068078)
 9_ESPE_NOX_SAT_JULIO2017-CORRV1_CA_28_08_LIZBETH JIMENEZ_MSGA.docx (D30405105)
 Tesis Ayala_Tesis(ICA).docx (D45011390)
 TESIS_30-OCT.docx (D31881131)
 Cuasquer_Paredes.pdf (D35761476)
 T. TITULACION ALEXANDRA MONGE-FIGEMPA.pdf (D89542221)
 Comparación de NO2 en Los Andes Ecuatorianos.docx (D54332362)
<https://docplayer.es/23778002-Alcalde-metropolitano-de-quito-mauricio-rodas.html>
http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/images/Secretaria_Ambiente/red_monitoreo/informacion/iqca_2009.pdf
<https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/8675/1/T-ESPE-047962.pdf>
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/571385/Reporte_Toluca_COVID_Final.pdf
<http://repositorio.udistrital.edu.co/bitstream/11349/24495/1/Pinz%C3%B3nHassanAngieDaniella2019.pdf>

Instances where selected sources appear:

35

Firma:

J. OLIVA A. DE ESLOBAR

Atiaga Franco, Oliva Lucia Ph.D.

C. C.1707046858.



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE**

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **"Análisis de la variación en la calidad del aire debido al confinamiento por COVID-19 en el Ecuador Continental"** fue realizado por la señorita **Guerrero García, Fernanda Mishell** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 19 de marzo de 2021

Firma:

ING. OLIVIA A. DE ESCOBAR

Atiaga Franco, Oliva Lucia Ph.D.

C. C.1707046858.



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERIA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Guerrero García, Fernanda Mishell**, con cédula de ciudadanía n°0401492780 declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Análisis de la variación en la calidad del aire debido al confinamiento por COVID-19 en el Ecuador Continental** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 19 de marzo de 2021

Firma:

Guerrero García, Fernanda Mishell,

C.C.: 0401492780



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, Guerrero García, Fernanda Mishell, con cédula de ciudadanía n°0401492780, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Análisis de la variación en la calidad del aire debido al confinamiento por COVID-19 en el Ecuador Continental** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 19 de marzo de 2021

Firma:

Guerrero García, Fernanda Mishell,

C.C.: 0401492780

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios por darme la oportunidad de vivir, por ser mi fortaleza en todos los momentos difíciles y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía.

A mi madre Fernanda, y mi padre William por ser mi pilar fundamental, por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida y de mis estudios académicos, por sus palabras de aliento, sus consejos y sobre todo su amor.

A mis hermanos Mateo y Luciana porque son la razón de sentirme tan orgullosa de culminar mi carrera profesional.

A mi mami Marce quien con sus consejos, valores y motivación constante me han permitido ser una persona de bien y más que nada su amor. A mi papito Bolito⁽⁺⁾ que sé que desde el cielo me bendice e ilumina mi camino para que siempre logre mis objetivos.

A Alexis, mi compañero de vida, por ser mi persona incondicional, por su amor, paciencia y sobre todo por siempre impulsarme a que logre mis metas y objetivos.

A mi amiga Yomi, con quien compartí momentos de alegrías y tristezas.

Fernanda Guerrero

Agradecimiento

A Dios porque fue mi luz, mi guía y mi compañía, gracias por darme la vida, por permitirme tener y disfrutar a mi familia y por siempre bendecir mi camino.

A mi Universidad de las Fuerzas Armadas- ESPE alma máter de la educación, después de años de esfuerzo, sacrificios, dedicación y grandes alegrías.

A todos los docentes, quienes se han tomado el arduo trabajo de transmitir su conocimiento para mi formación profesional, gracias por brindarme su apoyo incondicional y tiempo.

A mi directora de tesis Ph.D. Oliva Atiaga, por permitirme formar parte de este proyecto, por su valiosa guía y asesoramiento. Gracias por la paciencia, confianza y el apoyo brindado.

A los Ing. Rafael Castro, Ing. Edison Collaguazo, Ing. Ramiro Guerrón, Dr. Marco Luna y Dr. Oswaldo Padilla, gracias por el apoyo brindado, tiempo y esfuerzo que dedicaron a compartir sus conocimientos, consejos y aportaciones que hicieron posible este proyecto.

A mis tíos y tías; Cris, Chivi, Esteban, Negrito y Mafer, gracias por siempre abrirme las puertas de sus hogares y a mis primos gracias por llenar mi vida de momentos inolvidables y llenos de risas.

Mi eterno agradecimiento a mis padres Fer, William Marce y Bolívar, gracias por enseñarme lo que es la vida, y que con perseverancia y constancia se puede llegar a cumplir todo aquello que se propone.

Finalmente, a Alexis y su familia, agradeceré por siempre el día que te conocí, gracias por mantenerte siempre a mi lado, por ayudarme a construir mis sueños, y sobre todo por cuidar de mí.

Mi agradecimiento a todas las personas que me acompañaron en este caminar.

Fernanda Guerrero

Índice de Contenido

Urkund	2
Certificación	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Resumen	17
Abstract	18
Capítulo I	19
Aspectos Generales	19
Antecedentes	19
Planteamiento del Problema.....	20
Justificación e importancia.....	22
Objetivos.....	23
<i>Objetivo General</i>	23
<i>Objetivos Específicos</i>	24
Metas.....	24
Hipótesis de la investigación.....	24
Capítulo II	25
Marco Teórico	25
Contaminación atmosférica	25
<i>Clasificación de los contaminantes</i>	25
<i>Fuentes de emisión de los contaminantes</i>	27

Métodos de medición de contaminantes atmosféricos	27
<i>Redes de monitoreo terrestre</i>	28
<i>Teledetección satelital</i>	29
Análisis estadístico espacio-temporal.....	32
<i>Índice local de Moran</i>	32
<i>Índice Getis-Ord Local Gi</i>	33
<i>Índice Local Geary's C</i>	33
Análisis estadístico de datos.....	33
<i>Prueba Kolmogorov-Smirnov con corrección de Lilliefors</i>	34
<i>Prueba Levene</i>	34
<i>Análisis de varianza (ANOVA)</i>	34
<i>Prueba Kruskal-Wallis</i>	35
<i>Pruebas de separación de medias</i>	35
Normativa Legal Vigente.....	36
<i>Constitución de la República del Ecuador</i>	36
<i>Código orgánico del ambiente</i>	37
Capítulo III	38
Metodología	38
Zona de estudio.....	38
Obtención de imágenes satelitales Sentinel-5P	40
Procesamiento de imágenes satelitales	40
<i>Georreferenciación de imágenes satelitales</i>	41
<i>Recorte de imágenes satelitales S-5P</i>	42
Análisis estadístico espacio-temporal.....	47
<i>Selección de las provincias en estudio</i>	48
<i>Elaboración de una malla de celdas rectangulares</i>	50
Obtención de datos de contaminación a partir de imágenes S-5P.....	50

	10
Análisis estadístico de los datos de contaminación	53
Generación de la base de datos espacio-temporal.....	53
Obtención de datos de contaminación de redes de monitoreo terrestre	53
Validación de datos de contaminación	54
Capítulo IV	55
Resultados	55
Dióxido de nitrógeno	55
Dióxido de azufre	63
Ozono	75
Validación de datos de contaminación	85
Capítulo V	97
Discusión	97
Análisis de la variación de NO ₂	97
Análisis de la variación de SO ₂	98
Análisis de la variación de O ₃	99
Análisis de la validación de datos	100
Capítulo VI	101
Conclusiones y Recomendaciones	101
Conclusiones	101
Recomendaciones	102
Referencias Bibliográficas	103
Anexos	114

Índice de Tablas

Tabla 1 Fuentes de contaminación atmosférica.	27
Tabla 2 Estaciones de monitoreo atmosférico de la REMMAQ.	28
Tabla 3 Productos de datos de Sentinel-5P derivados con su respectiva longitud de onda.	31
Tabla 4 Imágenes satelitales S-5P utilizadas para el procesamiento y análisis.....	40
Tabla 5 Número de imágenes satelitales Sentinel-5P recortadas para los meses en estudio.....	43
Tabla 6 Concentraciones de NO ₂ para el periodo: diciembre de 2019-agosto de 2020.	57
Tabla 7 Concentraciones de NO ₂ para los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).	58
Tabla 8 Concentraciones de SO ₂ para el periodo: diciembre de 2019-agosto de 2020.	65
Tabla 9 Concentraciones de SO ₂ para los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).	67
Tabla 10 Concentraciones de O ₃ para el periodo: diciembre de 2019-agosto de 2020.	77
Tabla 11 Concentraciones de O ₃ para los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).	78

Índice de Figuras

Figura 1 Componentes de la teledetección.....	29
Figura 2 Principio de medición de Sentinel-5P/TROPOMI.	31
Figura 3 Mapa de ubicación del área de influencia: Ecuador Continental.	38
Figura 4 Diagrama de flujo para el análisis de la calidad del aire en el Ecuador Continental.	39
Figura 5 Concentraciones de NO ₂ para el 1 de diciembre de 2019.	41
Figura 6 Construcción del modelo en el software científico ENVI 5.5.6.....	42
Figura 7 Concentraciones de dióxido de nitrógeno para el 1 de diciembre de 2019 en el Ecuador Continental.	43
Figura 8 Serie de tiempo mes de diciembre de 2019.	44
Figura 9 Construcción del modelo en el software ENVI 5.5.6.	45
Figura 10 Promedio mensual de diciembre de 2019 para NO ₂	45
Figura 11 Promedio mensual de diciembre de 2019 para SO ₂	46
Figura 12 Promedio mensual de diciembre de 2019 para O ₃	46
Figura 13 Análisis espacio-temporal con el índice local de moran.....	47
Figura 14 Provincias seleccionadas para dióxido de nitrógeno.....	49
Figura 15 Provincias seleccionadas para dióxido de azufre.....	49
Figura 16 Provincias seleccionadas para ozono.....	50
Figura 17 Puntos de muestreo para el análisis de dióxido de nitrógeno.....	51
Figura 18 Puntos de muestreo para el análisis de dióxido de azufre.....	52
Figura 19 Puntos de muestreo para el análisis de ozono.....	52
Figura 20 Análisis multitemporal de NO ₂ en el Ecuador Continental.	56
Figura 21 Concentraciones de NO ₂ para Pichincha en el período: diciembre 2019-agosto 2020.	58
Figura 22 Concentraciones de NO ₂ para Pichincha en los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).....	59

Figura 23 Concentraciones de NO ₂ para Guayas en el periodo: diciembre 2019- agosto 2020.	60
Figura 24 Concentraciones de NO ₂ para Guayas en los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).....	60
Figura 25 Concentraciones de NO ₂ para Santo Domingo de los Tsáchilas en el periodo: diciembre 2019-agosto 2020.....	61
Figura 26 Concentraciones de NO ₂ para Santo Domingo de los Tsáchilas en los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).	62
Figura 27 Concentraciones de NO ₂ en los tres periodos: a) antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), b) durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y c) después del confinamiento (mayo-agosto 2020).	63
Figura 28 Análisis multitemporal de SO ₂ en el Ecuador Continental.....	64
Figura 29 Concentraciones de SO ₂ para Morona Santiago en el periodo: diciembre 2019-agosto 2020.	66
Figura 30 Concentraciones de SO ₂ para Morona Santiago en los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).	67
Figura 31 Concentraciones de SO ₂ para Chimborazo en el periodo: diciembre 2019- agosto 2020.	68
Figura 32 Concentraciones de SO ₂ para Chimborazo en los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).....	69
Figura 33 Concentraciones de SO ₂ para Guayas en el periodo: diciembre 2019- agosto 2020.	70

Figura 34 Concentraciones de SO ₂ para Guayas en los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).....	70
Figura 35 Concentraciones de SO ₂ para Santa Elena en el periodo: diciembre 2019-agosto 2020.	71
Figura 36 Concentraciones de SO ₂ para Santa Elena en los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).....	72
Figura 37 Concentraciones de SO ₂ para el Distrito Metropolitano de Quito en el periodo: diciembre 2019-agosto 2020.....	73
Figura 38 Concentraciones de SO ₂ para el Distrito Metropolitano de Quito en los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).	73
Figura 39 Concentraciones de SO ₂ en los tres periodos: a) antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), b) durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y c) después del confinamiento (mayo-agosto 2020)	74
Figura 40 Análisis multitemporal de O ₃ en Ecuador Continental.	76
Figura 41 Concentraciones de O ₃ para Guayas en el periodo: diciembre 2019-agosto 2020.	78
Figura 42 Concentraciones de O ₃ para Guayas en los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).....	79
Figura 43 Concentraciones de O ₃ para Sucumbíos en el periodo: diciembre 2019-agosto 2020.	80
Figura 44 Concentraciones de O ₃ para Sucumbíos en los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).....	80

Figura 45 Concentraciones de O ₃ para Pastaza en el periodo: diciembre 2019- agosto 2020.	81
Figura 46 Concentraciones de O ₃ para Pastaza en los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).....	82
Figura 47 Concentraciones de O ₃ para el Distrito Metropolitano de Quito en el periodo: diciembre 2019-agosto 2020.....	83
Figura 48 Concentraciones de O ₃ para el Distrito Metropolitano de Quito en los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) después del confinamiento (mayo-agosto 2020). 83	
Figura 49 Concentraciones de O ₃ en los tres periodos: a) antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), b) durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y c) después del confinamiento (mayo-agosto 2020).	84
Figura 50 Diagrama de dispersión de los diferentes contaminantes atmosféricos: NO ₂ , SO ₂ y O ₃ para el periodo: diciembre de 2019 – agosto de 2020.	85
Figura 51 Concentraciones de NO ₂ para las 8 estaciones de monitoreo de la REMMAQ en el periodo: diciembre de 2019 – agosto 2020.	87
Figura 52 Concentraciones de NO ₂ para las 8 estaciones de monitoreo de la REMMAQ en los periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).	88
Figura 53 Concentraciones de SO ₂ para las 8 estaciones de monitoreo de la REMMAQ para el periodo: diciembre de 2019 – agosto 2020.	90
Figura 54 Concentraciones de SO ₂ para las 8 estaciones de monitoreo de la REMMAQ en los periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020)	92

Figura 55 Concentraciones de O ₃ para las 9 estaciones de monitoreo de la REMMAQ para el periodo: diciembre de 2019 – agosto 2020	94
Figura 56 Concentraciones de O ₃ para las 9 estaciones de monitoreo de la REMMAQ en los periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).	95

Resumen

En el presente estudio se analizó la variabilidad espacio-temporal de la concentración de los contaminantes del aire: ozono (O_3), dióxido de azufre (SO_2) y dióxido de nitrógeno (NO_2) en provincias de Ecuador continental, debido al confinamiento por COVID-19 y mediante el uso de imágenes satelitales Sentinel – 5P. Para esto se realizó un análisis estadístico espacio-temporal y descriptivo de los diferentes contaminantes atmosféricos desde diciembre de 2019 hasta agosto de 2020 y en función de tres periodos; antes, durante y después del confinamiento por COVID-19, ubicando las provincias de concentraciones más altas para los gases estudiados (puntos calientes). Los resultados mostraron una disminución significativa en las concentraciones de NO_2 durante la etapa de confinamiento por COVID-19 en las provincias de Guayas, Pichincha y Santo Domingo de los Tsáchilas. Por otro lado, las concentraciones de SO_2 durante la etapa de confinamiento en el Distrito Metropolitano de Quito también disminuyeron significativamente, mientras que, en las provincias de Morona Santiago, Chimborazo y Santa Elena se obtuvo un aumento significativo durante esta etapa, y en la provincia de Guayas no mostró una variación significativa. Finalmente, las concentraciones de O_3 en las provincias de Guayas, Sucumbíos, Pastaza y el Distrito Metropolitano de Quito, indicaron un aumento significativo durante el confinamiento por COVID-19. Concluyendo que el confinamiento no tuvo el efecto esperado en la variación de las concentraciones de SO_2 y O_3 , en el caso de las concentraciones de SO_2 se atribuyó su variación principalmente a las emisiones del Volcán Sangay y las del ozono a factores meteorológicos.

PALABRAS CLAVE:

- **CALIDAD DEL AIRE**
- **COVID-19**
- **DIÓXIDO DE NITRÓGENO**
- **DIÓXIDO DE AZUFRE**
- **OZONO**

Abstract

This study analysed the space-time variability of air pollutant concentration: ozone (O_3), sulphur dioxide (SO_2) and nitrogen dioxide (NO_2) in provinces of Continental Ecuador, due to COVID-19 confinement and with the use of Sentinel – 5P satellite images. For this purpose, a space-time and descriptive statistical analysis of the different air pollutants was carried out from December 2019 to August 2020 and based on three periods; before, during and after COVID-19 confinement, locating the highest concentration provinces for the gases studied (hot spots). Results showed a significant decrease in NO_2 concentrations during the COVID-19 confinement stage in Guayas, Pichincha y Santo Domingo de los Tsáchilas provinces. On the other hand, SO_2 concentrations during the confinement stage in the Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) also decreased significantly, while, the provinces of Morona Santiago, Chimborazo and Santa Elena showed a significant increase during this stage, and in the province of Guayas did not present significant variation. Finally, the concentrations of O_3 in the provinces of Guayas, Sucumbíos, Pastaza and the DMQ indicated a significant increase during COVID-19 confinement. Concluding that confinement did not have the expected effect on the variation in SO_2 and O_3 concentrations, in the case of SO_2 concentrations its variation was attributed mainly to emissions from Sangay Volcano and ozone emissions to meteorological factors.

KEYWORDS:

- **AIR QUALITY**
- **COVID-19**
- **NITROGEN DIOXIDE**
- **SULPHUR DIOXIDE**
- **OZONE**

Capítulo I

Aspectos Generales

Antecedentes

La contaminación atmosférica se ha convertido en un problema ambiental preocupante, representando una amenaza importante en la salud y bienestar de la sociedad (Borrego et al., 2016). Entre los contaminantes más comunes se encuentran el material particulado (PM), el dióxido de nitrógeno (NO₂), el ozono troposférico (O₃), el monóxido de carbono (CO) y el dióxido de azufre (SO₂) (Burns et al., 2020).

Debido al constante aumento de las concentraciones de los contaminantes ambientales (West et al., 2016) producto del rápido crecimiento poblacional que ha provocado un proceso intenso de distribución y expansión de las áreas urbanas (Santana et al., 2010) junto con el desarrollo de diversas actividades como los servicios, la agroindustria, la industria y la construcción (Zheng et al., 2019). Han ocasionado particular incidencia en la generación e incremento de los niveles de contaminación (Romero Placeres et al., 2006) que, al relacionarse con las condiciones ambientales pueden causar impactos adversos en la salud intensificando la mortalidad de los seres humanos (Xiaoju et al., 2021).

La exposición a largo plazo a la contaminación del aire posee relaciones inversas y estadísticamente significativas con la esperanza de vida (Khafaie et al., 2016) pudiendo ocasionar varias enfermedades respiratorias y alérgicas (asma, bronquitis, neumonía y posiblemente tuberculosis), enfermedades cardiovasculares (infarto de miocardio, accidentes cerebrovasculares, insuficiencia cardíaca) (Rich, 2017) cáncer de pulmón, hipertensión (Ogen, 2020), enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) (Lyons et al., 2020) y diabetes (Shin et al., 2020). De la misma manera la exposición a corto plazo puede provocar cambios en los biomarcadores de inflamación (local y sistémica), estrés oxidativo, actividad de las

células endoteliales, disfunción vascular, presión arterial y variabilidad de la frecuencia cardíaca (Khafaie et al., 2016).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) señala que, a nivel mundial, la contaminación del aire ocasionó aproximadamente el 29% de las muertes por cáncer de pulmón, el 43% por EPOC, cerca del 25% por cardiopatía isquémica y el 24% por accidente cerebrovascular (OMS, 2020). De la misma manera estudios epidemiológicos y toxicológicos manifiestan que la exposición a diferentes contaminantes ambientales (Ren et al., 2017) incluso niveles por debajo de las normas de calidad se relacionan con un incremento en enfermedades respiratorias con efectos adversos para la salud (Burns et al., 2020). Asimismo, Ubilla & Yohannessen (2017) señalan que, varios estudios han catalogado a la contaminación del aire como una fuente establecida de mortalidad y morbilidad. La OMS estima a nivel mundial que el 12,5% de las muertes podrían evitarse mejorando la calidad del aire (OPS, 2018).

Por otro lado, estudios anteriores se han enfocado en determinar la variación espacio-temporal de la concentración de los contaminantes del aire especialmente de NO₂. Zheng et al., (2019) realizó una investigación en China basado en los datos de NO₂ de Sentinel-5P, el análisis reflejó la alta correlación entre la concentración de NO₂ por TROPOMI y la superficie medida, lo que revela el gran potencial de TROPOMI para indicar las condiciones de contaminación del aire en la superficie urbana. Del mismo modo un estudio efectuado en la ciudad de Bogotá comparó los contaminantes (CO, O₃, NO₂ y SO₂) del satélite Sentinel-5P con las estaciones de monitoreo terrestres de calidad del aire de la ciudad de Bogotá determinando similitud en los comportamientos de las series de tiempo de las variables de estudio entre los datos satelitales y terrestres (Forero, 2019).

Planteamiento del Problema

La contaminación atmosférica ha sido investigada y analizada dada su relación directa con la generación de problemas ambientales y de salud (Ramírez,

2017), ocasionando en los habitantes principalmente de áreas urbanas con un marcado desarrollo productivo e industrial, desde efectos fisiológicos imperceptibles hasta enfermedades e incluso la muerte (Ubilla & Yohannessen, 2017). Esto ha llevado a la necesidad de monitorear y analizar la calidad del aire a través de redes de monitoreo terrestre (Abad & Mejía, 2017), de tal manera que se puedan establecer medidas preventivas y de control, ya que estos efectos también poseen impactos significativos en el desarrollo económico y productivo de un país (Guerreiro et al., 2014).

Por otro lado, en Ecuador existen pocos estudios sobre la contaminación atmosférica debido a que en la mayoría de ciudades del país no existen equipos de monitoreo para medir la calidad del aire. Puesto que, este tipo de programas presentan limitaciones económicas para el presupuesto de los diferentes municipios y no ofrecen una cobertura global de las concentraciones de los contaminantes. Dado que, una estación de monitoreo generalmente representan un solo punto de observación y su generalización podría verse limitada (Schneider et al., 2017). Únicamente en Quito y Cuenca existen estaciones de monitoreo pasivas, automáticas y semiautomáticas que permiten monitorear la calidad del aire, y a su vez poder llevar a un control y a una buena gestión ambiental (Álvarez & Padilla, 2014).

Un estudio recientemente efectuado indicó una reducción equivalente al 4% en NO_2 debido al confinamiento por COVID-19. El investigador señaló que, los impactos del confinamiento obligatorio fueron positivos, pero de corta duración y limitados a variables relacionadas con actividades industriales y urbanas. El aislamiento social a nivel mundial implica una disminución sustancial en el tráfico de vehículos, personas, y en la actividad industrial (Oyague et al., 2020). De la misma manera Pacheco et al., (2020) señaló que, en Ecuador existió una reducción de NO_2 del (-13%) como consecuencia del COVID-19. Sin embargo, esta reducción se

produjo en mayor medida en los casos de Guayaquil (-23,4%) y Quito (-22,4%), las dos ciudades más pobladas de Ecuador.

Por lo expuesto, el presente proyecto de investigación buscó analizar la variación de los contaminantes del aire O₃, SO₂ y NO₂ debido al confinamiento por COVID-19 en el periodo desde diciembre de 2019 hasta agosto de 2020 utilizando datos proporcionados por el satélite de la constelación Copernicus Sentinel-5 Precursor.

Justificación e importancia

Se considera que el aire es un requisito básico para la salud y bienestar de los seres humanos (OMS, 2006), sin embargo, se ha visto afectado por diversos factores como las actividades industriales, el crecimiento demográfico y el tráfico vehicular (Liu et al., 2019) los cuales imponen progresivamente mayores exigencias de los recursos naturales y ocasionan el deterioro de la calidad del aire produciendo efectos negativos sobre la salud humana (Valls, 2017).

Por otro lado, se ha observado una disminución de la contaminación del aire en muchas regiones a escala mundial debido a la pandemia por COVID-19. En este sentido, es necesario que en el país existan investigaciones que permitan analizar la variación de la concentración de los diferentes contaminantes atmosféricos presentes en el país, junto con datos que representen una mayor variabilidad espacio-temporal (Pacheco et al., 2020) de modo que, represente información determinante para conocer la calidad del aire del Ecuador.

Bajo este concepto, es de gran importancia el control, monitoreo y análisis de la calidad del aire, ya que según Borrego et al., (2016), además de prever posibles enfermedades que afecten la salud de la población son necesarios para implementar estrategias de reducción e incentivar la conciencia ambiental entre los ciudadanos. Normalmente este trabajo se ha ejecutado utilizando estaciones de medida en tierra y aplicando complejos modelos atmosféricos que predicen la calidad del aire entre estaciones de monitoreo (Juodis et al., 2016), sin embargo, cuando las estaciones

de monitoreo están muy distantes entre sí o cuando la zona de estudio es muy grande, el uso de imágenes de sensores remotos permite el monitoreo y análisis de los contaminantes (Jerves et al., 2016), visto que, el rápido desarrollo del método de monitoreo de detección remota de bajo costo se ha convertido gradualmente en el medio clave para el monitoreo a largo plazo del cambio ambiental global atmosférico (West et al., 2016). No obstante, en la actualidad los mapas detallados de contaminación del aire son escasos ya que la red de monitoreo terrestre tradicional altamente precisa es muy costosa. De esta manera, el bajo número de estaciones de monitoreo, generalmente no son capaces de capturar adecuadamente todo el espacio geográfico de un área determinada (Schneider et al., 2017).

Ecuador, asumiendo su responsabilidad con la constitución vigente y los objetivos de desarrollo sostenible se encuentra en el deber de garantizar un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, asegurando la sostenibilidad y el buen vivir (Constitución de la República del Ecuador, 2008), además de generar y utilizar diferentes herramientas que ayuden a mejorar la calidad de vida de la población dentro de las ciudades (Peña, 2018). Dentro de este contexto, es importante que el Ecuador pueda conocer la variación de la contaminación del aire de los diferentes contaminantes atmosféricos debido al confinamiento por COVID-19, otorgando a las autoridades ambientales y territoriales un referente técnico que promueva la implementación de futuras políticas públicas ambientales, manejo de estándares y estrategias de calidad del aire, que permitan de cierta manera mitigar sus efectos en la salud y que estén acorde a las necesidades e intereses de los ecuatorianos por conocer la calidad del aire que respiran.

Objetivos

Objetivo General

Analizar la variabilidad espacio-temporal de la concentración de los contaminantes del aire (O_3 , SO_2 , NO_2) en el Ecuador Continental debido al

confinamiento por COVID-19 mediante el uso de imágenes satelitales Sentinel – 5P para cuantificar el impacto en la calidad del aire.

Objetivos Específicos

- Realizar un análisis espacio-temporal de los niveles de concentración de los gases O₃, SO₂, y NO₂ a través de imágenes satelitales Sentinel-5P para observar la variación en el periodo de diciembre 2019 a agosto 2020.
- Determinar la variación de los niveles de concentración de los gases O₃, SO₂, y NO₂ debido al confinamiento por COVID-19 mediante análisis estadístico multitemporal para identificar zonas de mayor contaminación (puntos calientes).
- Realizar un análisis geoespacial para determinar las provincias más afectadas dentro del área de estudio por la variación de las concentraciones de los gases debido al confinamiento por COVID-19 y determinar las causas.

Metas

- 3 Series de tiempo de las diferentes concentraciones de los gases O₃, SO₂, y NO₂ desde diciembre 2019 hasta agosto 2020 en el Ecuador Continental.
- 27 imágenes clasificadas del análisis de puntos calientes de la variación espacio-temporal de la concentración de los gases O₃, SO₂, NO₂ en el Ecuador Continental debido al confinamiento por COVID-19.
- 1 Base de datos espacio-temporal del resultado obtenido del análisis geoespacial para determinar las provincias más afectadas por la variación de la concentración de los gases O₃, SO₂, NO₂ debido al confinamiento por COVID-19 en el Ecuador Continental.
- 1 Reporte estadístico de la validación de la base de datos espacial.

Hipótesis de la investigación

Existe una reducción en los niveles de concentración de los gases (O₃, SO₂, N₂) debido al confinamiento por COVID-19.

Capítulo II

Marco Teórico

Contaminación atmosférica

La OMS (2017) define a la contaminación del aire como la contaminación de ambientes tanto exteriores como interiores dada por cualquier agente químico, físico o biológico que modifique las características naturales de la atmósfera. Asimismo Yassi et al., (2002) señala que, la emisión de sustancias peligrosas al aire, a una tasa que excede la capacidad de los procesos naturales de la atmósfera para transformarlos, precipitarlos y depositarlos o diluirlos por medio del viento y el movimiento del aire se conoce como contaminación atmosférica.

Por otro lado, estudios han relacionado la exposición a la contaminación del aire con una mayor gravedad en las infecciones por COVID-19, indicando un mayor número de muertes en algunas de las áreas más contaminadas a nivel mundial (Wu et al., 2020) como es el caso de los Estados Unidos donde se indica que, la exposición a diferentes contaminantes del aire es un factor que contribuye a la mortalidad por COVID-19 en el país (Petroni et al., 2020). Además, se ha demostrado que la contaminación juega un papel cada vez más importante en las enfermedades cutáneas más comunes. Se ha indicado que, el acné, la hiperpigmentación, la dermatitis atópica y la psoriasis están influenciados por la exposición a la contaminación del aire (Araviiskaia et al., 2019).

Clasificación de los contaminantes

De acuerdo a Oyarzún (2010) los contaminantes atmosféricos se clasifican según su estado físico en diferentes gases como: dióxido de nitrógeno NO₂, ozono O₃, dióxido de azufre SO₂ y monóxido de carbono CO.

Monóxido de carbono (CO). Gas traza incoloro (sin color), inodoro (sin olor) e insípido (sin sabor) no irritante y altamente tóxico (Bolaños & Chacón, 2017). Las principales fuentes de CO son la combustión incompleta (calentadores de agua, hornillas, estufas, chimeneas) quema de biomasa, gases de escape de los

automóviles en un lugar cerrado y otros procesos industriales o químicos como la oxidación atmosférica del metano y otros hidrocarburos (Guirola et al., 2019).

Dióxido de nitrógeno (NO₂). Gas traza precursor del ácido nítrico, nitratos y compuestos tóxicos derivados que se forman por la reacción fotoquímica del NO y compuestos volátiles en el aire (Secretaría del Ambiente, 2020). En presencia de luz solar, un ciclo fotoquímico que involucra al ozono (O₃) convierte NO en NO₂ (y viceversa), de modo que NO₂ es una medida robusta para las concentraciones de óxidos de nitrógeno. El NO₂ junto con el óxido nítrico (NO) son los únicos óxidos de nitrógeno en la atmósfera introducidos por el ser humano como resultado de actividades antropogénicas (combustión de combustibles fósiles y quema de biomasa) y procesos naturales (microbiológicos en suelos, incendios forestales y rayos) (ESA, 2021b). Otras fuentes de emisión del contaminante son los automóviles, refinerías de petróleo, manufactura de vidrio y ácido nítrico (Green & Sánchez, 2013).

Dióxido de azufre (SO₂). Gas incoloro, no inflamable con olor irritante característico, que puede ocasionar irritación en las membranas de las mucosas conjuntiva y respiratoria causando enfermedades cardiovasculares y respiratorias (García et al., 2013). Las principales fuentes de emisión de dióxido de azufre corresponden a emisiones naturales emitidos por volcanes en forma directa, la combustión de combustibles fósiles en plantas eléctricas y termoeléctricas (Davis & Masten, 2005), procesos industriales de metales y uso de fertilizantes (Secretaría del Ambiente, 2018). Por otro lado Campos (2000) indica que, se estima que la vida media del dióxido de azufre en la atmósfera es corta, y se mantiene en el aire por un periodo de dos a cuatro días durante los cuales puede llegar a distancias de 1000 km. Por consiguiente, casi la mitad de las emisiones vuelven a depositarse en la superficie, mientras que el resto puede formar trióxido de azufre el cual al combinarse con vapor de agua forma ácido sulfúrico (H₂SO₄).

Ozono (O₃). El ozono está presente en dos niveles de la atmósfera: en la tropósfera (capa que se extiende desde la superficie hasta aproximadamente 10 km) y en la estratósfera (capa atmosférica entre 10 y 40 km). En la estratósfera el O₃ se encuentra en su gran mayoría y actúa como barrera para proteger la superficie de la Tierra de la radiación solar ultravioleta permitiendo que solamente una pequeña parte llegue a la superficie, sin embargo, el ozono que se encuentra en la tropósfera es perjudicial para la salud de los seres humanos, los animales y la vegetación (NASA, 2001). El ozono troposférico es un contaminante secundario que no se emite directamente a la atmósfera por ninguna fuente y se forma a partir de reacciones fotoquímicas complejas con intensa luz solar entre contaminantes primarios como los óxidos de nitrógeno (NO, NO₂) y compuestos orgánicos volátiles (COV_s) (Belmonte & Gutiérrez, 2013).

Fuentes de emisión de los contaminantes

Según Martínez & Lluveras (2019) todas las actividades, procesos u operaciones capaces de producir contaminantes del aire se consideran fuentes de emisión y se clasifican en naturales y antropogénicas como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1

Fuentes de contaminación atmosférica.

Clasificación	Fuentes de emisión
Fuentes naturales	Emisiones volcánicas, incendios forestales, aerosol marino, descomposición de la materia orgánica en pantanos y suelos, polvos originados por la acción del viento y el polen
Fuentes antropogénicas	Generación de energía, procesos de combustión, emisión de vehículos, minas, canteras e industria de materiales de construcción, procesos de calentamiento, procesos metalúrgicos químicos, extracción de combustibles y centrales nucleares.

Nota. Datos tomados de (Martínez & Lluveras, 2019).

Métodos de medición de contaminantes atmosféricos

Existen dos métodos de medición de los diferentes contaminantes del aire: redes de monitoreo terrestre y teledetección satelital.

Redes de monitoreo terrestre

Conjunto de estaciones de muestreo, generalmente fijas y continuas, que se establecen para comparar parámetros ambientales con estándares de calidad a través de la medición de diferentes contaminantes atmosféricos como: monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, ozono, material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) y datos meteorológicos (Abad & Mejía, 2017;Grosso et al., 2007). Según Cobo & Arcos (2016) las redes de monitoreo se ubican de acuerdo a la metodología establecida por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA), en base a los siguientes criterios: 1) los contaminantes analizados; 2) los métodos de monitoreo (muestreadores pasivos, activos, analizadores automáticos y sensores remotos); 3) la escala de representación espacial; y 4) los criterios de emplazamiento y operación. En este sentido, en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) se dispone de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ) que incluye nueve estaciones automáticas fijas que cumple con las recomendaciones de la US-EPA (Secretaría del Ambiente, 2018). En la Tabla 2 se indica la disponibilidad de analizadores de gases y partículas en las estaciones remotas de la REMMAQ.

Tabla 2

Estaciones de monitoreo atmosférico de la REMMAQ.

Estación	Contaminantes atmosféricos				
	NO ₂	O ₃	SO ₂	PM _{2.5}	PM ₁₀
Carapungo	x	x	x	x	x
Cotocollao	x	x	x	x	
Belisario	x	x	x	x	
Centro	x	x	x	x	
El Camal	x	x	x	x	
Guamaní	x	x	x		x
Los Chillos	x	x	x		
Tumbaco	x	x	x		x
San Antonio de Pichicha		x		x	x

Nota. Datos tomados de (Secretaría del Ambiente, 2018).

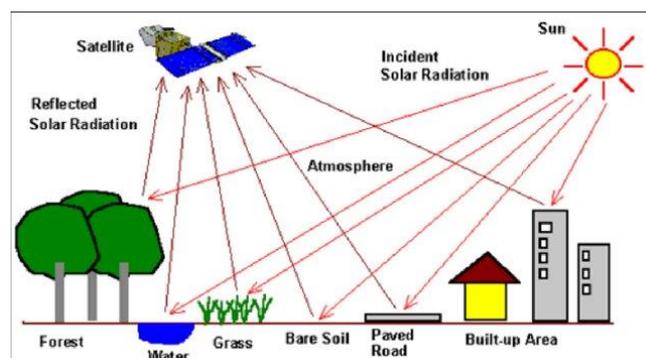
Teledetección satelital

Recopilar información de la superficie de la Tierra sin estar en contacto físico directo con ella, mediante sensores instalados en plataformas espaciales (Chuvieco, 1995). La teledetección puede ser de dos tipos: pasiva y activa, en la teledetección pasiva el sensor capta la radiación emitida o reflejada por el objeto debido al sol, en cambio en la teledetección activa el sensor emite la radiación necesaria la cual es reflejada por el objeto; en los dos casos existe interacción de flujo de radiación que parte de los objetos y se dirige hacia el sensor, dicho flujo de energía es conocido como radiación electromagnética (Chuvieco, 2008).

En la Figura 1 se indica el proceso de teledetección, que inicia con la emisión de luz solar hacia la superficie, la cual entra en contacto e interacciona con la atmósfera, dicha energía golpea con un objeto y es absorbida, reflejada o transmitida a través de la atmósfera. La radiación es detectada por el satélite, la cual responde de manera distinta a las propiedades físicas de la superficie y de la atmósfera y de esta manera, cuando la radiación solar interactúa con el objeto se obtiene la firma espectral, y a partir de ello se puede identificar la huella espectral para cada contaminante atmosférico. La información obtenida es transmitida a una antena de recepción, donde en un centro de procesamiento se procesan los datos y las mediciones satelitales son convertidas en imágenes satelitales (Chuvieco, 2008).

Figura 1

Componentes de la teledetección.



Nota. Figura tomada de (Navarrete & Laubacher, 2017).

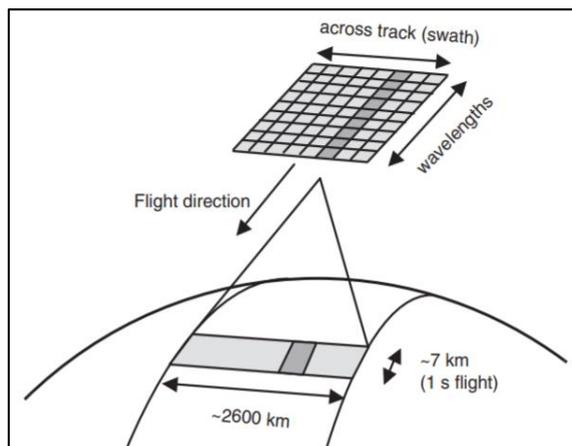
Existen varios satélites medioambientales que proporcionan información global y diaria, de calidad y fácil acceso como el satélite Aura lanzado en el año 2004 bajo la iniciativa de la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio (NASA) que lleva el instrumento OMI (Instrumento de monitoreo de ozono) que facilita información de distintos contaminantes atmosféricos (NO_2 , O_3 , SO_2 , CH_2O , aerosoles), y el satélite Sentinel-5 Precursor (S-5P) lanzado en el año 2017 por la Agencia Espacial Europea (ESA) que cuenta con el instrumento TROPOMI (Instrumento de Monitoreo TROPOsférico) que proporciona información de diferentes gases traza (O_3 , NO_2 , SO_2 , CO , CH_4 y CH_2O) y aerosoles. Para el proyecto se empleó el satélite Sentinel-5P.

Sentinel – 5 Precursor. Es un satélite que opera en una órbita sincrónica al sol a 824 km, vuela a una altitud de 817 km, un ciclo de repetición de 17 días y un tiempo de sobrevuelo en el nodo ascendente (LTAN) de 13:30 (hora local). Cuenta con un único instrumento, el espectrómetro de imágenes de visión nadir multiespectral de detección pasiva TROPOMI (van Geffen et al., 2019). TROPOMI funciona en una configuración de escoba de empuje (sin escaneo), con un campo de visión instantáneo de 108° y un periodo de medición de aproximadamente 1 segundo, dando como resultado un ancho de franja de aproximadamente 2600 km, y una resolución a lo largo de la pista de 7 km (Figura 2) (Veefkind et al., 2012).

El instrumento TROPOMI es un espectrómetro con bandas espectrales en el ultravioleta (UV), UV-visible (UVIS), infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de longitud de onda corta (SWIR). El tamaño de píxel típico (cerca del nadir) será de $7 \times 3.5 \text{ km}^2$ para todas las bandas espectrales, con la excepción de la banda UV1 ($7 \times 28 \text{ km}^2$) y las bandas SWIR ($7 \times 7 \text{ km}^2$) (ESA, 2021a), sin embargo, existió un cambio en la resolución espacial de las mediciones de TROPOMI aumentando su resolución de 7 km a 5,5 km para todas las mediciones a partir del 6 de agosto de 2019 (Lambert & Keppens, 2020).

Figura 2

Principio de medición de Sentinel-5P/TROPOMI.



Nota. Figura tomada de (Veefkind et al., 2012).

La misión Sentinel-5P proporciona diferentes productos de datos asociados con los tres niveles de procesamiento de TROPOMI nivel 0, 1B y 2. Los productos de nivel 2 de observación de la Tierra son imágenes multiespectrales de fecha única calibradas radiométricamente en valores de reflectancia de superficie corregidos para efectos atmosféricos y topográficos (Baraldi et al., 2018). Adicionalmente la ESA (2021a) señala que, los productos de nivel 2 son columnas totales geolocalizadas de O₃, SO₂, NO₂, CO, CH₂O, CH₄, columnas troposféricas geolocalizadas de O₃, perfiles verticales geolocalizados de O₃. En la Tabla 3 se muestra los productos de Sentinel-5P derivados del programa Copernicus, el espectro de absorción y la longitud de onda para cada contaminante atmosférico.

Tabla 3

Productos de datos de Sentinel-5P derivados con su respectiva longitud de onda.

Producto Principal	Longitud de onda (nm)	Parámetro Principal	Espectrómetro
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	405–465	Columna Total	UVIS
Ozono (O ₃)	270-310	Columna Total	UV1-2
Dióxido de azufre (SO ₂)	312-325	Columna Total	UV2

Nota. Datos tomados de (Forero, 2019) y (Zweers, 2018).

Para la obtención de las imágenes satelitales Sentinel- 5P existen tres flujos de datos diferentes: casi en tiempo real (NRTI), fuera de línea (OFFL) y el flujo de reprocesamiento (RPRO). Es recomendable que la mayoría de los usuarios utilicen los datos OFFL disponibles unos días después de la adquisición, o la última versión de los datos reprocesados ya que, los datos NRTI a veces pueden estar incompletos y tienen una calidad de datos ligeramente inferior en comparación con los otros flujos de datos y los datos reprocesados son recomendables para análisis de tendencias que involucre diferentes épocas para evitar cambios debido a las actualizaciones de las versiones (ESA, 2021b).

Análisis estadístico espacio-temporal

Las capacidades de visualización, recuperación rápida de datos y manipulación en los SIG (sistemas de información geográfica) han creado la necesidad de técnicas de análisis de datos exploratorios que se centran en los aspectos "espaciales" de los datos (Anselin, 2010) para analizar la evolución temporal del comportamiento espacial de magnitudes aleatorias de gran interés en diferentes estudios, y que permiten la representación de los diferentes niveles de interacción espacio-temporal que caracterizan la estructura de dependencia de magnitudes definidas en el espacio y tiempo (Gómez, 2008). Existen diferentes estadísticas espaciales locales como: índice local de mora, índice getis-ord local gi y el índice local geary's c.

Índice local de Moran

El índice identifica la agrupación de píxeles. Los valores positivos indican un grupo de valores similares, mientras que los valores negativos no implican ningún agrupamiento (es decir, alta variabilidad entre píxeles vecinos). ENVI utiliza el método de Anselin para el índice local de moran calculando una matriz de pesos espaciales por filas y variables estandarizadas (Anselin, 2010). Según Zheng et al., (2019) el índice local de moran es el estadístico de evaluación espacial más conocido y ampliamente empleado para describir la distribución global de un

fenómeno geográfico y para determinar si existen características de agregación espacial. De la misma manera Ramírez & Lilián (2015) mencionan que, el índice local más conocido y difundido para el análisis espacio-temporal es el estadístico de Moran ya que funciona acertadamente en variables del medio físico-natural y en el análisis de variables sociales o demográficas.

Índice Getis-Ord Local Gi

El índice identifica puntos calientes, como áreas de valores muy altos o muy bajos que se encuentran cerca unas de otras, siendo útil para determinar grupos de valores similares, donde las concentraciones de valores altos dan como resultado un valor de G_i alto y las concentraciones de valores bajos dan como resultado un valor de G_i bajo. Los resultados de este índice difieren de los resultados del índice local de Moran porque los grupos de valores negativos dan valores altos para Moran, pero valores bajos para G_i (Getis & Ord, 2010).

Índice Local Geary's C

El índice estadístico identifica áreas de alta variabilidad entre un valor de píxel y los píxeles vecinos. Es útil para detectar áreas de borde entre grupos y otras áreas con valores vecinos diferentes. ENVI utiliza el método Anselin para el índice local Geary's C calculando una matriz de pesos espaciales por filas y variables estandarizadas (Getis & Ord, 2010).

Análisis estadístico de datos

Los datos derivados de un experimento tienen como finalidad proveer información con respecto a la manera en que las unidades experimentales responden a los tratamientos aplicados. Por ello, es necesario analizarlos estadísticamente para comprender la forma en que las unidades experimentales reaccionan a los tratamientos aplicados de manera que, se debe aplicar a los datos un análisis de varianza con la finalidad de establecer si existe o no diferencia significativa entre las medias de los tratamientos (García-Villalpando et al., 2001). Para poder aplicar los diferentes test estadísticos para pruebas paramétricas y no

paramétricas Reyna (2019) indica en su investigación que existen paquetes programados en software estadísticos, utilizados para realizar análisis estadísticos y obtener resultados fiables en las investigaciones.

Prueba Kolmogorov-Smirnov con corrección de Lilliefors

El estadístico Lilliefors (LF) es una modificación de la prueba de Kolmogorov-Smirnov (K-S) empleado para variables cuantitativas continuas y para tamaños muestrales mayores de 50 (Romero-Saldaña, 2016). LF es una prueba de significación estadística para verificar si un conjunto de datos procede de una distribución normal. La prueba tabula el estadístico de Kolmogorov-Smirnov para el caso más habitual en el que desconocemos la media y la varianza poblacional y se estiman en función de la muestra (Razali & Wah, 2011).

Prueba Levene

La estadística de Levene se utiliza para evaluar si k muestras tienen varianzas iguales, su igualdad es denominada como homogeneidad u homocedasticidad de varianza (Bisquerra, 1987). La prueba ofrece una alternativa más robusta que la estadística de Bartlett, ya que es poco sensible a la desviación de la normalidad, lo que significa que será menos probable que se rechace una verdadera hipótesis de varianzas iguales solo porque las distribuciones de las poblaciones muestreadas no son normales (Correa et al., 2006).

Análisis de varianza (ANOVA)

El análisis de varianza (ANOVA) es una prueba paramétrica que se centra en el análisis de los datos experimentales, ya que permite estudiar la comparación entre 2 o más medias entre sí, para determinar el grado de similitud o diferencia que existen entre ellas. Es decir, se basa en separar la variabilidad derivada por los tratamientos y generada por el error, cuando la primera destaca sobre la segunda se deduce que, existe diferencia entre los tratamientos, es decir las medias son diferentes, mientras que si los tratamientos no sobresalen o son menor o igual que el error se concluye que las medias son iguales, entonces, no existe diferencia entre

los tratamientos (Pulido & De la Vara, 2008). En general, las pruebas paramétricas son más potentes que las no paramétricas, pero exigen que se cumplan una serie de requisitos previos como la normalidad en la distribución de la variable cuantitativa en los grupos que se comparan, la homocedasticidad en las poblaciones de las que proceden los grupos, es decir que las varianzas de las poblaciones son iguales y finalmente las muestras sobre las que se aplica el tratamiento son independientes (Rubio & Berlanga, 2012).

Prueba Kruskal-Wallis

Prueba estadística no paramétrica que evalúa las diferencias entre tres o más grupos muestreados independientemente en una única variable continua no distribuida normalmente. El único supuesto necesario es que las distribuciones subyacentes de las variables sean continuas y que éstas hayan sido medidas por lo menos en una escala ordinal (Núñez, 2018). Una aplicación típica de la prueba de Kruskal-Wallis es evaluar si tres o más grupos difieren en una sola variable que no cumple con los supuestos de normalidad de la prueba estadística paramétrica de análisis de varianza (Mc Kight & Najab, 2009).

Pruebas de separación de medias

Tirado & Tirado, (2017) señalan que, cuando se poseen diferentes tratamientos, se presenta el problema de hacer la comparación de las medias de los tratamientos, a fin de discriminar variables y clasificarlos para elegir el mejor si es necesario. Especialistas en la estadística establecieron un conjunto de métodos estadísticos y procedimientos que permiten ejecutar pruebas de separación de medias, donde se pueden comparar los efectos medios de los tratamientos evaluados experimentalmente en niveles de contraste. Con los datos del análisis de varianza se hacen las pruebas de significancia de las diferencias o las comparaciones entre las medias de los tratamientos. Además de la prueba de contrastes ortogonales y la prueba de Scheffé, existen otros métodos como la

prueba de diferencia mínima significativa (DMS), la prueba de Duncan, prueba de Tukey, entre otras (Wong-González, 2010).

Prueba Tukey. La prueba estadística de Tukey es la más utilizada por los estadísticos conjuntamente con ANOVA, permite de mejor manera un mayor control de los errores estadísticos (α y β), además realiza todas las posibles comparaciones, de dos en dos, de los tratamientos y por este motivo se considera la más completa entre las tres pruebas estadísticas: Dunnet, Duncan y Tukey (Wong-González, 2010). La prueba se fundamenta en el cálculo de la Diferencia Significativa Honesta (DSH), para decidir las diferencias entre algún par de medias de los tratamientos (Gustavo, 2015).

Prueba U Mann-Whitney. La prueba estadística conocida también como U-test es la prueba no paramétrica alternativa a la prueba t sobre diferencia de medias cuando: i) no se cumplen los supuestos de normalidad y de homocedasticidad o ii) cuando no es apropiado utilizar la prueba t porque el nivel de medida de los datos de dos muestras independientes son de tipo ordinal (Marques Dos Santos, 2001). Adicionalmente, Rivas-Ruiz et al., (2013) mencionan que, si se quiere demostrar que existen diferencias entre dos grupos con variables cuantitativas con distribución no normal, se utiliza la prueba estadística U de Mann-Whitney.

Normativa Legal Vigente

En orden jerárquico se presenta la normativa legal ambiental vigente en el Ecuador.

Constitución de la República del Ecuador

*Art. 14.- “Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, **sumak kawsay**.”*

Art. 66.- “Se reconocerá y garantizará a las personas: el derecho a vivir en un ambiente sano, ecológicamente equilibrado, libre de contaminación y en armonía con la naturaleza”.

Art. 83.- *Son deberes y responsabilidades de los y las ecuatorianas, sin perjuicio de otros previstos en la Constitución y la ley: “Respetar los derechos de la naturaleza, preservar un ambiente sano y utilizar los recursos naturales de modo racional, sustentable y sostenible”.*

Art. 246.- *“Recuperar y conservar la naturaleza y mantener un ambiente sano y sustentable que garantice a las personas y colectividades el acceso equitativo, permanente y de calidad al agua, aire y suelo”.*

Art. 326.- *“Toda persona tendrá derecho a desarrollar sus labores en un ambiente adecuado y propicio, que garantice su salud, integridad, seguridad, higiene y bienestar “ (Constitución de la República del Ecuador, 2008).*

Código orgánico del ambiente

Art. 4.- *Criterios ambientales territoriales: “Para la planificación del desarrollo y el ordenamiento territorial, todos los niveles de gobierno deberán tomar en cuenta diferentes criterios ambientales generales:*

- a) *Considerar al ambiente y sus dinámicas como elementos estratégicos y de soporte para el bienestar humano y el desarrollo de la sociedad”.*

Art. 249.- *Tipos y características. - “Los ecosistemas pueden proveer varios servicios ambientales y, sin perjuicio de otras definiciones y clasificaciones que la Autoridad Ambiental Nacional expida, se reconocen los siguientes tipos y características de servicios ambientales”.*

Art. 806.- *Mejora de indicadores ambientales. - “Los GADs podrán acceder a financiamiento del Fondo Nacional para la Gestión Ambiental, por la mejora de los indicadores ambientales en sus respectivas jurisdicciones, en el marco del Plan Nacional de Inversiones Ambientales, conforme a diferentes criterios generales como: Mejoría de la calidad del aire, agua y suelo” (Código Orgánico Del Ambiente, 2017).*

Capítulo III

Metodología

Zona de estudio

Ecuador Continental como área de estudio del proyecto de investigación, es un país perteneciente a América Latina, ubicado específicamente 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 este con Perú y al oeste con el Océano Pacífico (Figura 3). Posee una extensión de 256.370 km^2 (INEC, 2010) y una población de $17' 510 643$ millones de personas (INEC, 2020). Ecuador Continental se divide en 3 regiones, distribuidas en 23 provincias y 218 cantones (MREMH, 2020).

Figura 3

Mapa de ubicación del área de influencia: Ecuador Continental.

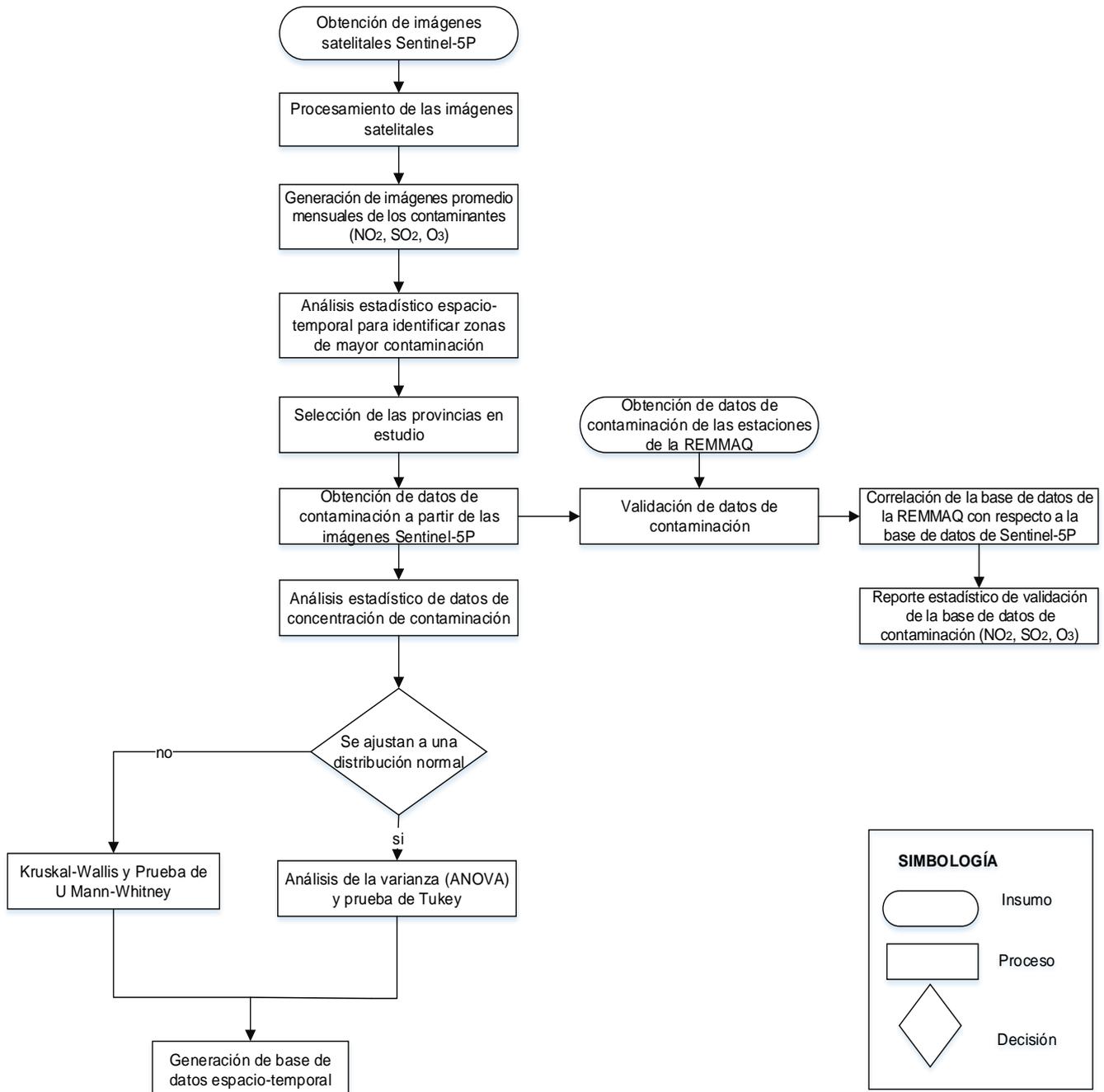


Nota. (Autora, 2021).

La metodología realizada en el presente proyecto se describió de manera general en la Figura 4.

Figura 4

Diagrama de flujo para el análisis de la calidad del aire en el Ecuador Continental.



Nota. (Autora, 2021).

Obtención de imágenes satelitales Sentinel-5P

Las imágenes satelitales registradas por el satélite Sentinel-5 Precursor, fueron obtenidas mediante el uso de la API (Interfaz de programación de aplicaciones) de libre acceso de la Agencia Espacial Europea, generadas mediante tres flujos de datos: casi en tiempo real (NRTI), fuera de línea (OFFL) y el flujo de reprocesamiento (RPRO), sin embargo, para el proyecto se seleccionó el flujo OFFL recomendado para ser utilizado por la mayoría de usuarios, disponibles unos días después de la adquisición (ESA, 2021b). Para la descarga se realizó una búsqueda de todas las imágenes satelitales disponibles en la zona de estudio, tomando en cuenta el periodo del 1 diciembre de 2019 al 31 de agosto de 2020, obteniéndose 219 imágenes para NO₂ y 221 imágenes para SO₂ y O₃ respectivamente (Tabla 4), a lo mencionado se consideró que las imágenes satelitales cubran todo el Ecuador Continental dando como resultado 661 imágenes para el procesamiento y análisis de los diferentes contaminantes atmosféricos (NO₂, SO₂ y O₃).

Tabla 4

Imágenes satelitales S-5P utilizadas para el procesamiento y análisis.

Contaminante	Número de imágenes	Descripción del archivo de datos
NO ₂	219	S5P_OFFL_L2_NO2____
SO ₂	221	S5P_OFFL_L2_SO2____
O ₃	221	S5P_OFFL_L2_O3____

Nota. (Autora, 2021).

Procesamiento de imágenes satelitales

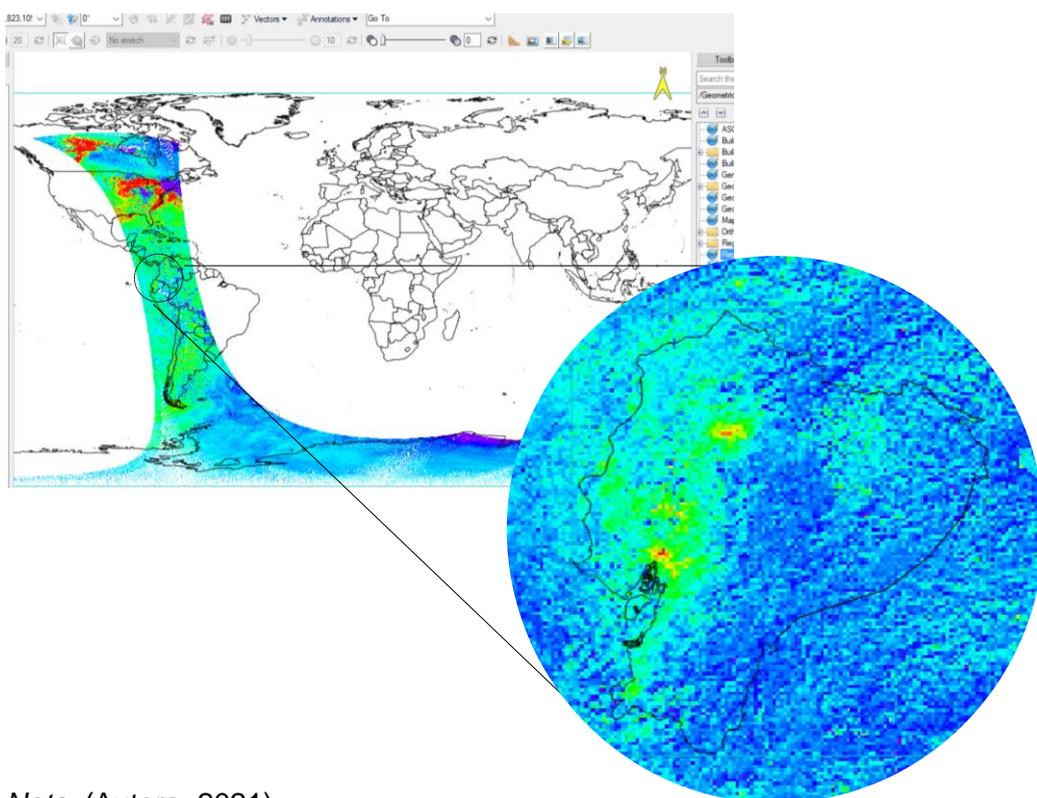
Las 661 imágenes satelitales de Sentinel-5P/TROPOMI utilizadas en el proyecto presentaron un nivel 2 de procesamiento, y fueron otorgadas en formato de archivo multidimensional net.CDF (Network Common Data For), formato de archivo destinado a almacenar datos científicos multidimensionales. Por consiguiente, las imágenes fueron exportadas desde los datos científicos a un formato de imagen, teniendo como producto final imágenes satelitales con formato .dat.

Georreferenciación de imágenes satelitales

Para el procesamiento de las imágenes satelitales Sentinel- 5P, se georreferenció a un sistema de referencia espacial global mediante la herramienta *reproject GLT with bowtie correction* del software científico ENVI 5.5.6 como se observa en la Figura 5, la reproyección se realizó de la misma manera para cada contaminante atmosférico (NO₂, SO₂, O₃).

Figura 5

Concentraciones de NO₂ para el 1 de diciembre de 2019.



Nota. (Autora, 2021).

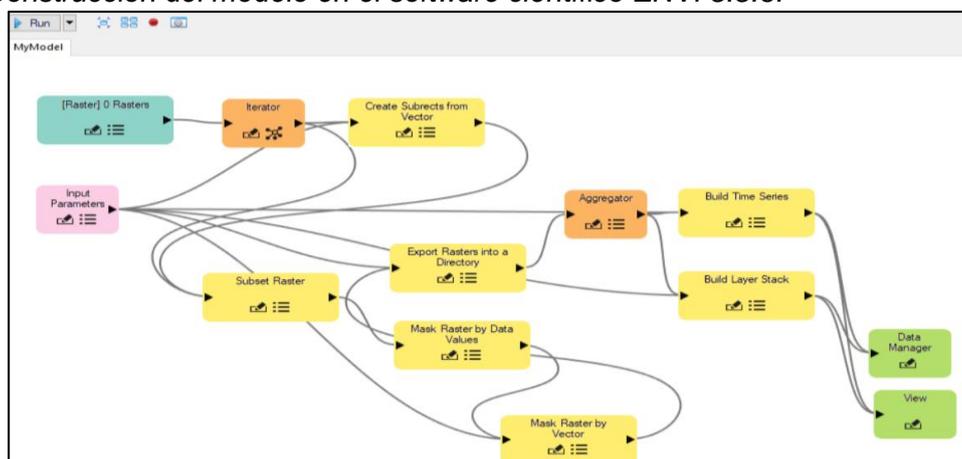
Una vez realizada la reproyección, se determinó que las imágenes a ser estudiadas presenten una corrección geométrica adecuada (Figura 5), mediante una comparación espacial con la cartografía oficial de libre acceso del Instituto Geográfico Militar (IGM) siendo la base que permitió efectuar el análisis de la variabilidad espacio-temporal de los diferentes contaminantes atmosféricos (NO₂, SO₂, O₃).

Recorte de imágenes satelitales S-5P

Con el fin de reducir el tiempo de procesamiento de las imágenes satelitales se construyó un modelo con la herramienta *ENVI modeler* de programación visual que permitió crear y ejecutar flujos de trabajo personalizados con herramientas de geoprocésamiento, basado en diferentes tareas y con dos elementos principales los nodos y conectores. Para la ejecución del modelo, se empleó como insumo las imágenes satelitales reproyectadas en formato ráster. En primer lugar, se ingresó como parámetros de entrada las imágenes comprendidas en cada mes y para cada contaminante (NO_2 , SO_2 , O_3) en específico. Es importante mencionar que, se utilizó una herramienta de *iterador* que permitió procesar cada imagen satelital hasta que se terminen de ejecutar todos los insumos contenidos en la herramienta *raster*. Posteriormente se integró la capa del Ecuador Continental, y se adicionó la herramienta *mask raster by data values* que permitió crear un enmascarado a partir de un ráster de origen en este caso las imágenes reproyectadas, y la herramienta *mask raster by vector* que permitió enmascarar un ráster usando un vector en este caso la capa del perfil del Ecuador Continental como se indica en la Figura 6. Después de construir el flujo de trabajo antes de ejecutarlo fue validado mediante la herramienta *code - validate model*.

Figura 6

Construcción del modelo en el software científico ENVI 5.5.6.



Nota. (Autora, 2021).

Se obtuvieron imágenes satelitales recortadas (Figura 7) tomando en cuenta el periodo del 1 diciembre de 2019 al 31 de agosto de 2020. Dando como resultado el total de imágenes para cada mes en estudio y contaminante atmosférico (NO_2 , SO_2 , O_3), mismos que se describen en la Tabla 5.

Tabla 5

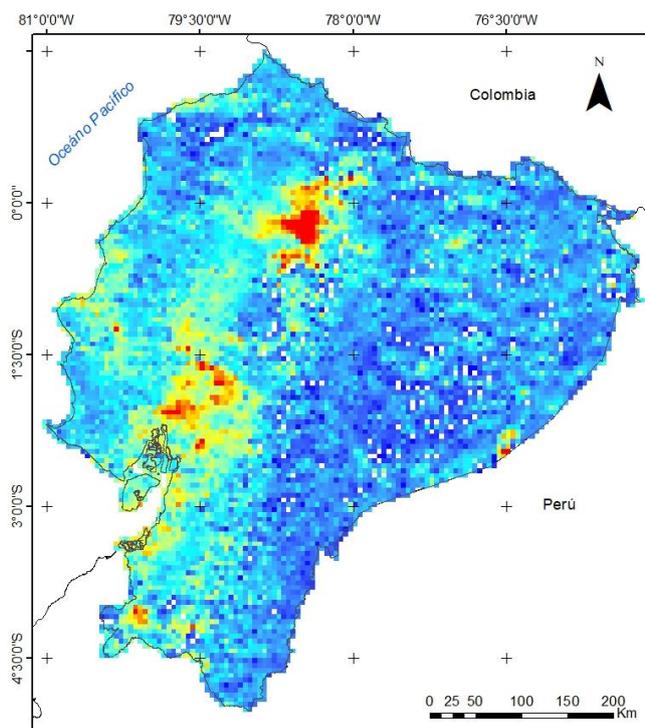
Número de imágenes satelitales Sentinel-5P recortadas para los meses en estudio.

Mes	Contaminantes atmosféricos		
	NO_2	SO_2	O_3
Diciembre	25	25	25
Enero	25	25	25
Febrero	24	24	24
Marzo	25	25	25
Abril	24	24	24
Mayo	26	26	26
Junio	24	24	24
Julio	22	24	24
Agosto	24	24	24

Nota. (Autora, 2021).

Figura 7

Concentraciones de dióxido de nitrógeno para el 1 de diciembre de 2019 en el Ecuador Continental.

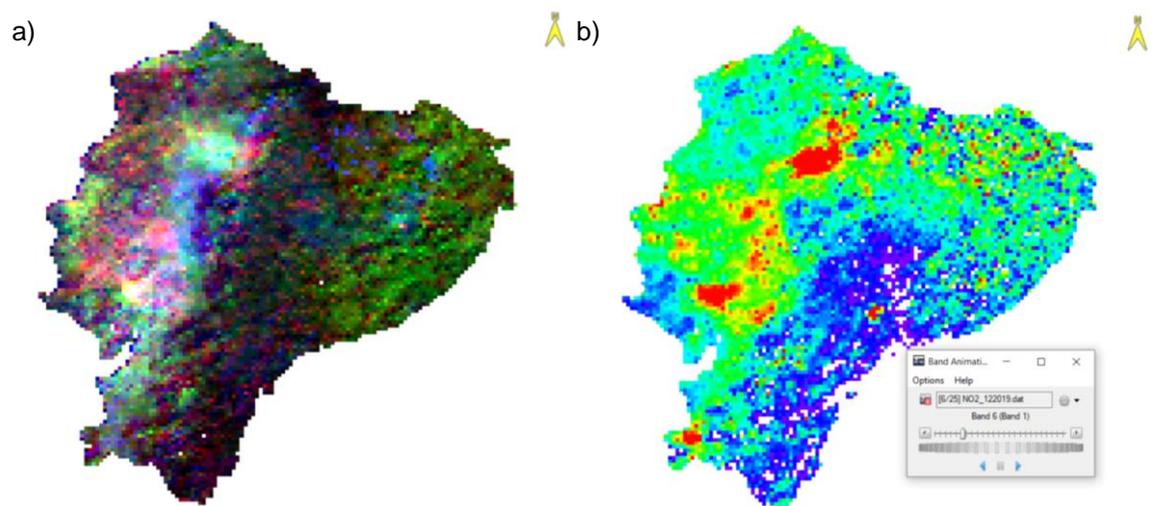


Nota. (Autora, 2021).

De la misma manera en el flujo de trabajo construido (Figura 6) mediante la herramienta *ENVI modeler* del software ENV 5.5.6 se creó series de tiempo para los diferentes contaminantes atmosféricos (NO_2 , SO_2 , O_3) mediante la herramienta *build time series* que permitió ordenar una serie de ráster por tiempo de adquisición y crear una serie temporal con la colección de imágenes satelitales ráster como se indica en la Figura 8.

Figura 8

Serie de tiempo mes de diciembre de 2019.



Nota. a) Dióxido de nitrógeno b) Imagen satelital del 6 de diciembre de 2019 comprendida en la serie temporal (Autora, 2021).

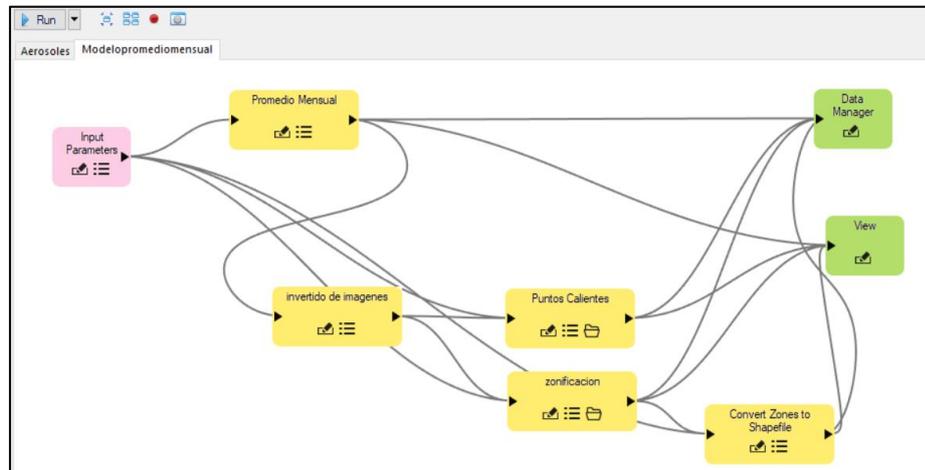
Generación de imágenes promedio mensuales de los contaminantes

Para obtener las imágenes promedio mensuales para cada contaminante atmosférico (NO_2 , SO_2 , O_3) se elaboró un flujo de trabajo mediante la herramienta *ENVI modeler* (Figura 9) donde se ingresó como parámetros de entrada las imágenes Sentinel-5P recortadas con la capa del Ecuador Continental y mediante la herramienta *band math* del software ENV 5.5.6 que permitió aplicar una operación matemática a una o más bandas de la imagen, se obtuvo como producto final imágenes promedio mensuales desde el mes de diciembre de 2019 hasta agosto de 2020. Se utilizó la media aritmética dependiendo del número de imágenes

procesadas para cada mes y contaminante. En la Figura 10 se indica la imagen promedio mensual de dióxido de nitrógeno para el mes de diciembre.

Figura 9

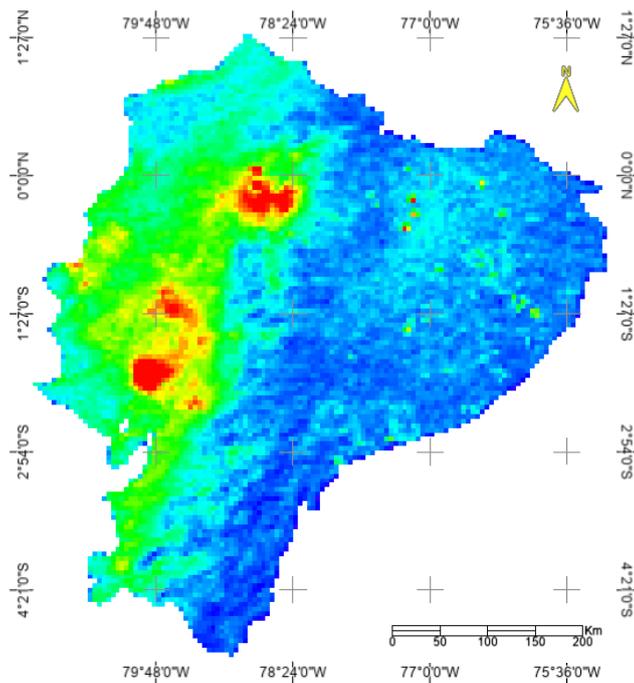
Construcción del modelo en el software ENVI 5.5.6.



Nota. (Autora, 2021).

Figura 10

Promedio mensual de diciembre de 2019 para NO₂.

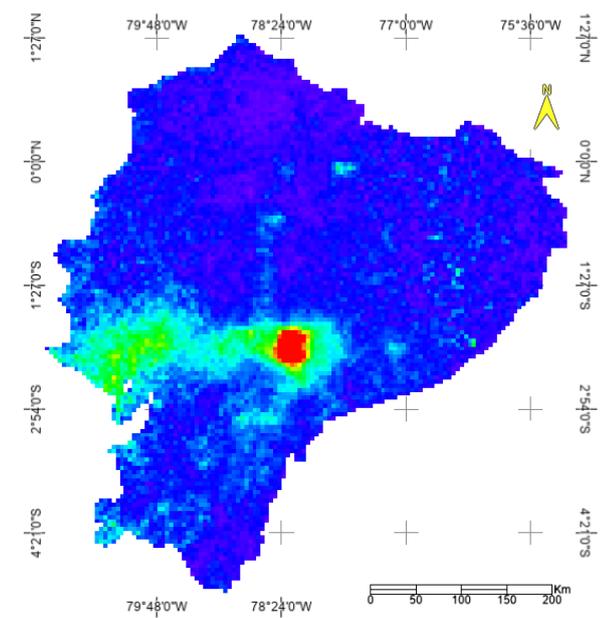


Nota. (Autora, 2021).

En la Figura 11 y Figura 12 se indican las imágenes promedio mensuales de dióxido de azufre y ozono respectivamente para el mes de diciembre.

Figura 11

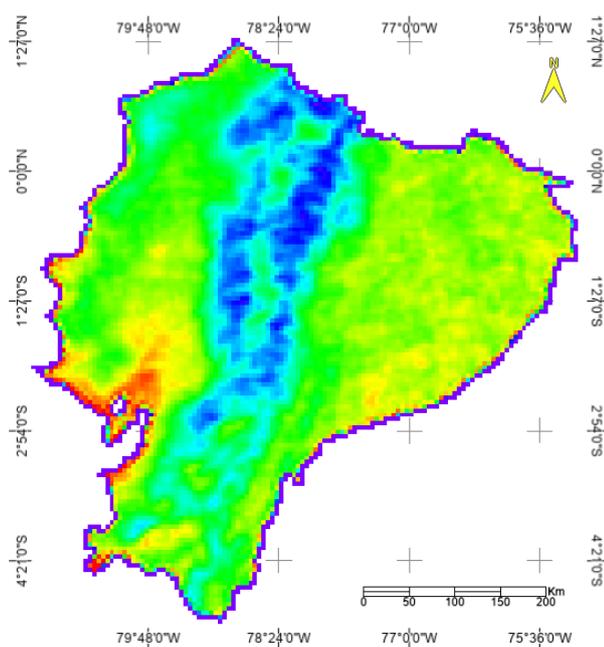
Promedio mensual de diciembre de 2019 para SO₂.



Nota. (Autora, 2021).

Figura 12

Promedio mensual de diciembre de 2019 para O₃.



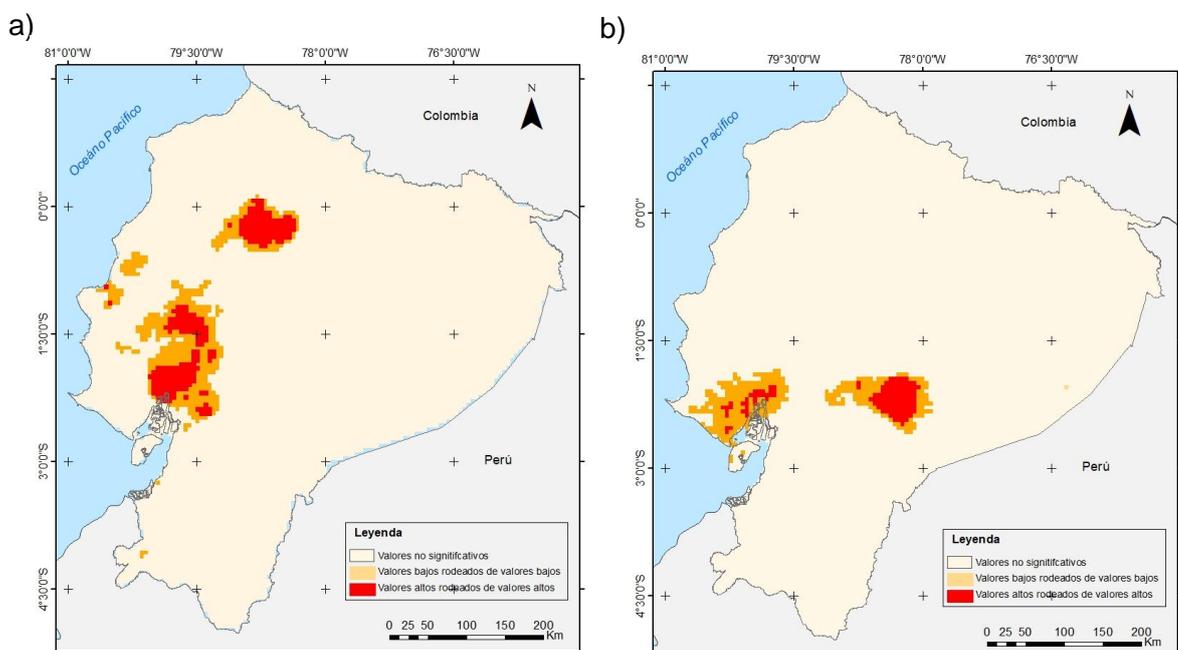
Nota. (Autora, 2021).

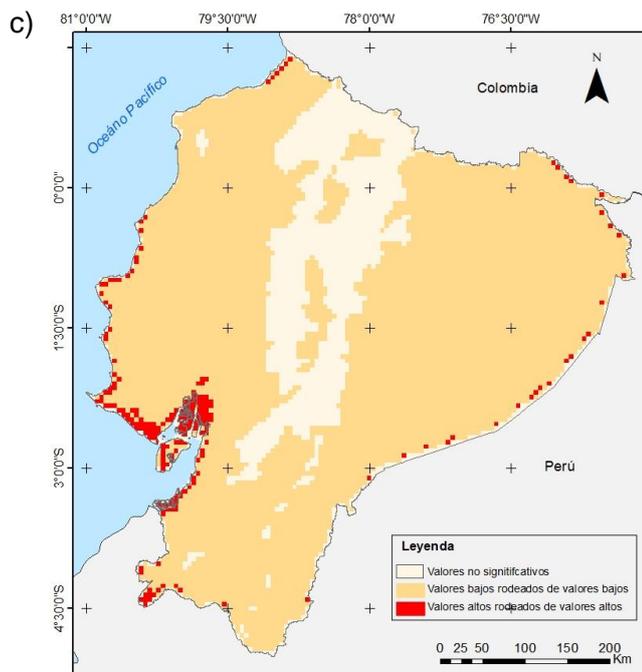
Análisis estadístico espacio-temporal

El análisis estadístico espacio-temporal se lo realizó empleando la herramienta *local spatial statistics* del software científico ENVI 5.5.6, la cual busca áreas específicas en una imagen que tienen grupos de valores similares o diferentes. Para ello, el software ENVI 5.5.6. proporciona tres estadísticas espaciales locales: Anselin Local Moran's I, Getis-Ord Local Gi y Anselin Local Geary's C. En este sentido, se aplicaron las tres estadísticas para la determinación de los puntos calientes obteniéndose resultados semejantes, por lo cual se eligió el índice de Moran por ser el estadístico de evaluación espacial más conocido y ampliamente empleado (Zheng et al., 2019; Ramírez & Lilián, 2015). En la Figura 13 se indica el análisis estadístico espacio-temporal de las imágenes promedio mensuales del mes de diciembre de 2019 para los diferentes gases (NO_2 , SO_2 , O_3) en estudio, donde se observa los grupos de unidades espaciales de los datos estadísticos del índice de Moran: valores altos rodeados de valores altos, valores bajos rodeados de valores bajos y valores estadísticamente no significativos.

Figura 13

Análisis estadístico espacio-temporal con el índice local de Moran.





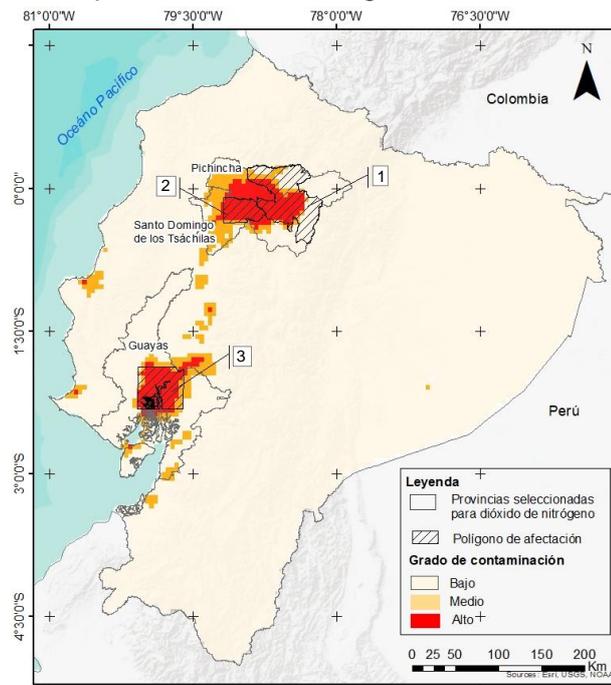
Nota. a) Dióxido de nitrógeno b) Dióxido de azufre c) Ozono (Autora, 2021).

Selección de las provincias en estudio

Una vez identificados los puntos calientes, se procedió a determinar las provincias del Ecuador Continental más afectadas y a su vez dentro de las mismas, se seleccionó polígonos de afectación en función del nivel de contaminación teniendo en cuenta los nueve meses en estudio. Bajo este criterio, para el contaminante de dióxido de nitrógeno se seleccionó a Pichincha, Guayas y Santo Domingo como se indica en la Figura 14. De la misma manera para el análisis de dióxido de azufre se eligió a Morona Santiago, Chimborazo, Guayas y Santa Elena como se observa en la Figura 15, y finalmente para el contaminante ozono se seleccionó a Guayas, Sucumbíos y Pastaza como se muestra en la Figura 16. Para la obtención y análisis estadístico de los datos en cada provincia seleccionada se definieron polígonos de afectación tomando en cuenta los nueve meses analizados. Además, para el análisis se seleccionó como caso de estudio al DMQ ya que, Vinueza (2018) indicó que su calidad del aire constituye un caso muy vulnerable a la contaminación atmosférica.

Figura 14

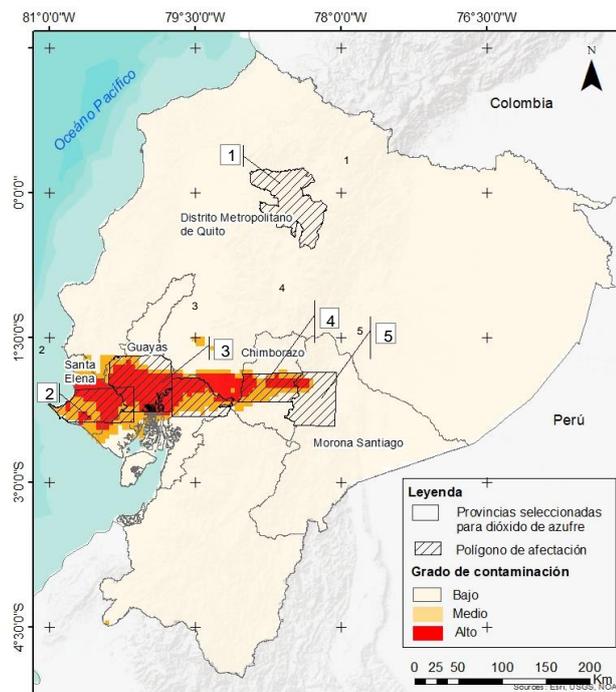
Provincias seleccionadas para dióxido de nitrógeno.



Nota. Mes de febrero de 2020 (Autora, 2021).

Figura 15

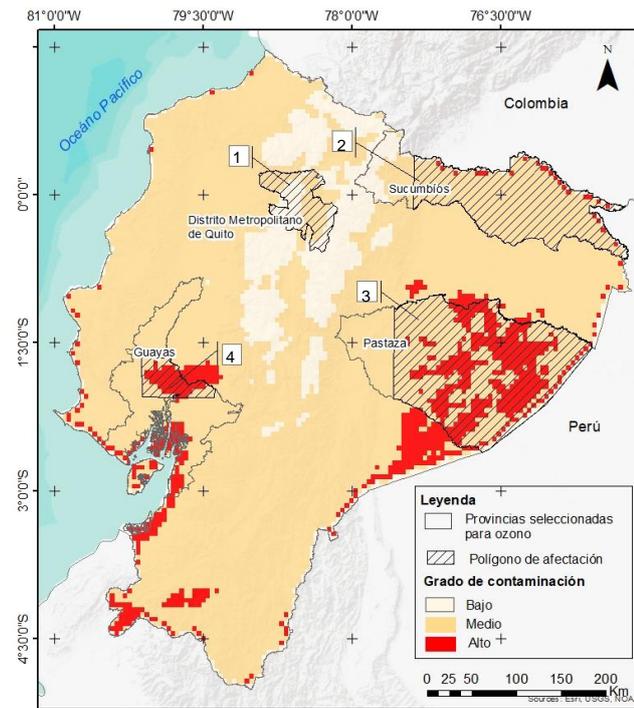
Provincias seleccionadas para dióxido de azufre.



Nota. Mes de julio de 2020 (Autora, 2021).

Figura 16

Provincias seleccionadas para ozono.



Nota. Mes de febrero de 2020 (Autora, 2021).

Elaboración de una malla de celdas rectangulares

Se generó una red de celdas rectangulares cubriendo la extensión espacial de todo el Ecuador Continental mediante la herramienta *create fishnet* del software ArcGIS 10.8, con una distancia de 5,5 km entre los puntos. La malla de puntos fue generada con el fin de obtener los datos de contaminación para los diferentes polígonos de afectación correspondientes a cada una de las provincias seleccionadas para el estudio y para la generación de la base de datos espacio-temporal.

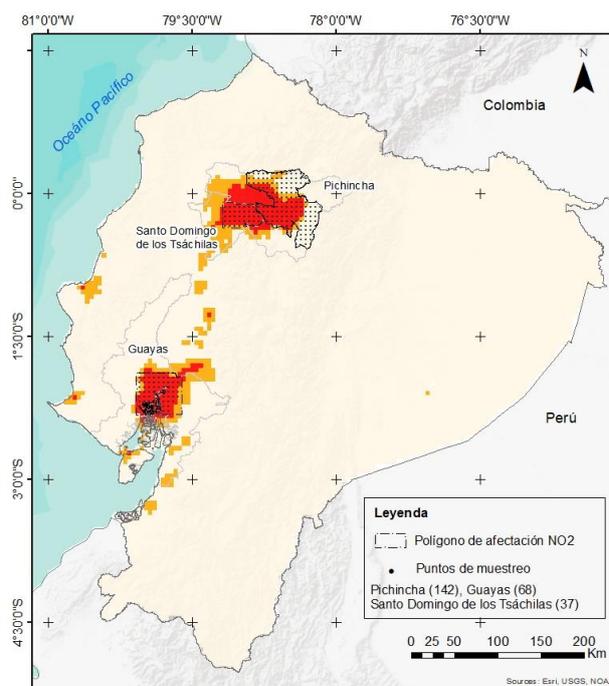
Obtención de datos de contaminación a partir de imágenes S-5P

Se obtuvieron los datos de contaminación mediante el empleo de la herramienta *extract multi values to point* del software científico ArcGIS 10.8 que permitió extraer los valores de celdas en ubicaciones específicas en una clase de entidad de punto desde uno o más rásteres y registrar los valores en la tabla de

atributos de la clase de entidad de punto. Finalmente, para el análisis estadístico de variabilidad de los datos de contaminación se obtuvieron 142 datos para el Distrito Metropolitano de Quito, el cual fue analizado para todos los contaminantes atmosféricos (NO_2 , SO_2 , O_3) en estudio. De la misma manera para dióxido de nitrógeno se obtuvieron 68 puntos de muestreo para la provincia del Guayas y 37 puntos de muestreo para la provincia de Santo Domingo (Figura 17). Además, para el análisis de dióxido de azufre se obtuvieron 40 puntos para la provincia de Chimborazo, 187 puntos para la provincia del Guayas, 71 puntos para la provincia de Morona Santiago y 73 puntos para la provincia de Santa Elena (Figura 18) y por último para el caso del contaminante ozono se obtuvo 45 puntos para la provincia de Guayas, 389 puntos para la provincia de Pastaza y 194 puntos para la provincia de Sucumbíos (Figura 19).

Figura 17

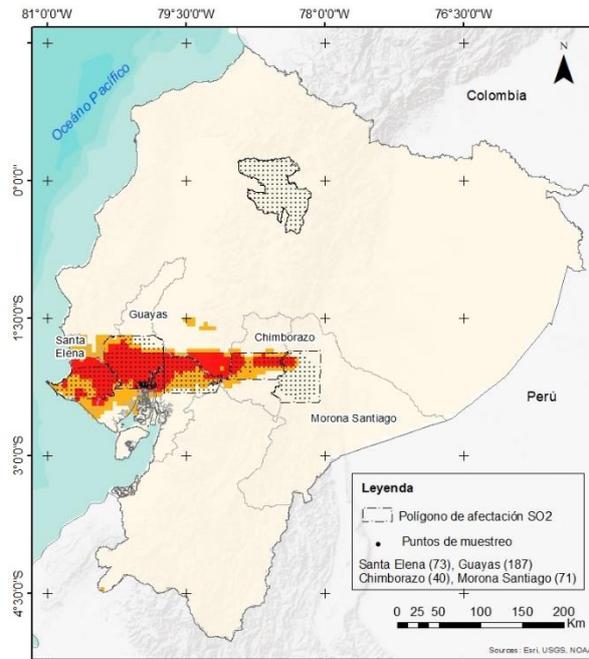
Puntos de muestreo para el análisis de dióxido de nitrógeno



Nota. 247 puntos de muestreo en total (Autora, 2021).

Figura 18

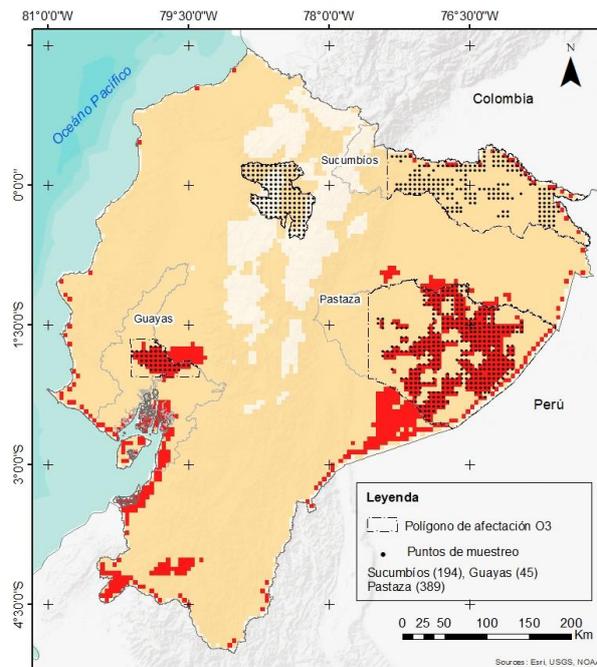
Puntos de muestreo para el análisis de dióxido de azufre.



Nota. 513 puntos de muestreo en total (Autora, 2021).

Figura 19

Puntos de muestreo para el análisis de ozono.



Nota. 770 puntos de muestreo en total (Autora, 2021).

Análisis estadístico de los datos de contaminación

El proyecto tuvo como objetivo general realizar un análisis de la variabilidad espacio-temporal de los contaminantes del aire O_3 , SO_2 y NO_2 debido al confinamiento por COVID-19, para lo cual se establecieron 3 periodos diferentes: antes (diciembre, enero y febrero), durante (marzo, abril y mayo) y después del confinamiento (junio, julio y agosto). Se obtuvieron datos de contaminación para determinar la variación de las concentraciones de los contaminantes del aire, en función del promedio mensual y de los 3 periodos analizados en las provincias especialmente afectadas en el periodo de diciembre de 2019 a agosto de 2020 para los diferentes contaminantes. El análisis estadístico se realizó empleado el software R Studio donde se contrastó si los datos se ajustaron o no a una distribución normal con la prueba de Kolmogorov-Smirnov con la corrección de Lilliefors (más de 50 observaciones). Para datos provenientes de una distribución normal se realizó el análisis de la varianza (ANOVA) y la prueba de Tukey para determinar diferencias significativas, en caso de que los datos no se ajusten a una distribución normal se utilizó las pruebas de Kruskal-Wallis y la prueba Post-Hoc de U Mann-Whitney. Para contrastar la homocedasticidad se utilizó la prueba de Levene.

Generación de la base de datos espacio-temporal

Los datos de contaminación obtenidos en la investigación se distribuyeron en 2 geodatabases: la primera incluyó 27 imágenes clasificadas del análisis estadístico espacio-temporal (puntos calientes) de los diferentes contaminantes del aire (O_3 , NO_2 y SO_2) en los nueve meses de estudio; y la segunda abarcó la base de datos promedio mensual para los tres contaminantes en estudio desde diciembre de 2019 hasta agosto de 2020.

Obtención de datos de contaminación de redes de monitoreo terrestre

Se obtuvieron los datos promedios mensuales de los tres contaminantes del aire (O_3 , NO_2 y SO_2) en los nueve meses en estudio, comprendidos entre la 13:00 y 14:00 horas teniendo en cuenta que, el satélite Sentinel-5P pasa sobre el Ecuador

aproximadamente a la 13:30 hora local (Veefkind et al., 2012) de las ocho estaciones de monitoreo de la REMMAQ del DMQ: Belisario, Carapungo, Centro Histórico, Cotocollao, El Camal, Guamaní, Los Chillos y Tumbaco para la validación de datos de NO₂ y SO₂ mientras que, para la validación de O₃ se utilizó a parte de las mencionadas la estación de San Antonio de Pichincha.

Validación de datos de contaminación

Los datos de contaminación se extrajeron en base a las coordenadas geográficas de las diferentes estaciones de la REMMAQ y de las imágenes satelitales promedios mensuales generadas en el proyecto, con el uso de la herramienta *extract multi values to points* del software ArcGIS 10.8 que permitió extraer los valores de celda en ubicaciones específicas y registrarlos en una tabla. Una vez extraídos los datos de contaminación a partir de las imágenes Sentinel-5P se elaboró la base de datos para cada contaminante atmosférico.

Correlación de la base de datos de la REMMAQ con respecto a la base de datos de Sentinel-5P

En la validación de los datos se correlacionó la base de datos de las estaciones de monitoreo con la base de datos satelital, para lo cual se obtuvo los datos de contaminación de Sentinel-5P correspondientes a la localización geográfica de las estaciones de monitoreo de la REMMAQ. Sentinel-5P mide cantidad de sustancia de una densidad de columna vertical en $\frac{mol}{m^2}$ y las estaciones de monitoreo de la REMMAQ en unidades de concentración $\frac{ug}{m^3}$. El análisis de correlación entre la concentración de las estaciones de monitoreo de la REMMAQ en la superficie terrestre y la concentración de la columna vertical de Sentinel-5P, se realizó mediante el método de regresión lineal simple (Zheng et al., 2019; Forero, 2019), con el fin de determinar la dirección y fuerza de la asociación entre dos variables cuantitativas, permitiendo conocer la intensidad de la relación y determinar si, al aumentar el valor de una variable, aumenta o disminuye el valor de la otra variable.

Capítulo IV

Resultados

En el desarrollo del proyecto se analizó la variabilidad de la calidad del aire en el Ecuador Continental de diferentes contaminantes atmosféricos (NO_2 , SO_2 y O_3) debido al confinamiento por COVID-19 mediante el uso de imágenes satelitales Sentinel-5P en la secuencia temporal del 1 de diciembre de 2019 al 31 de agosto de 2020.

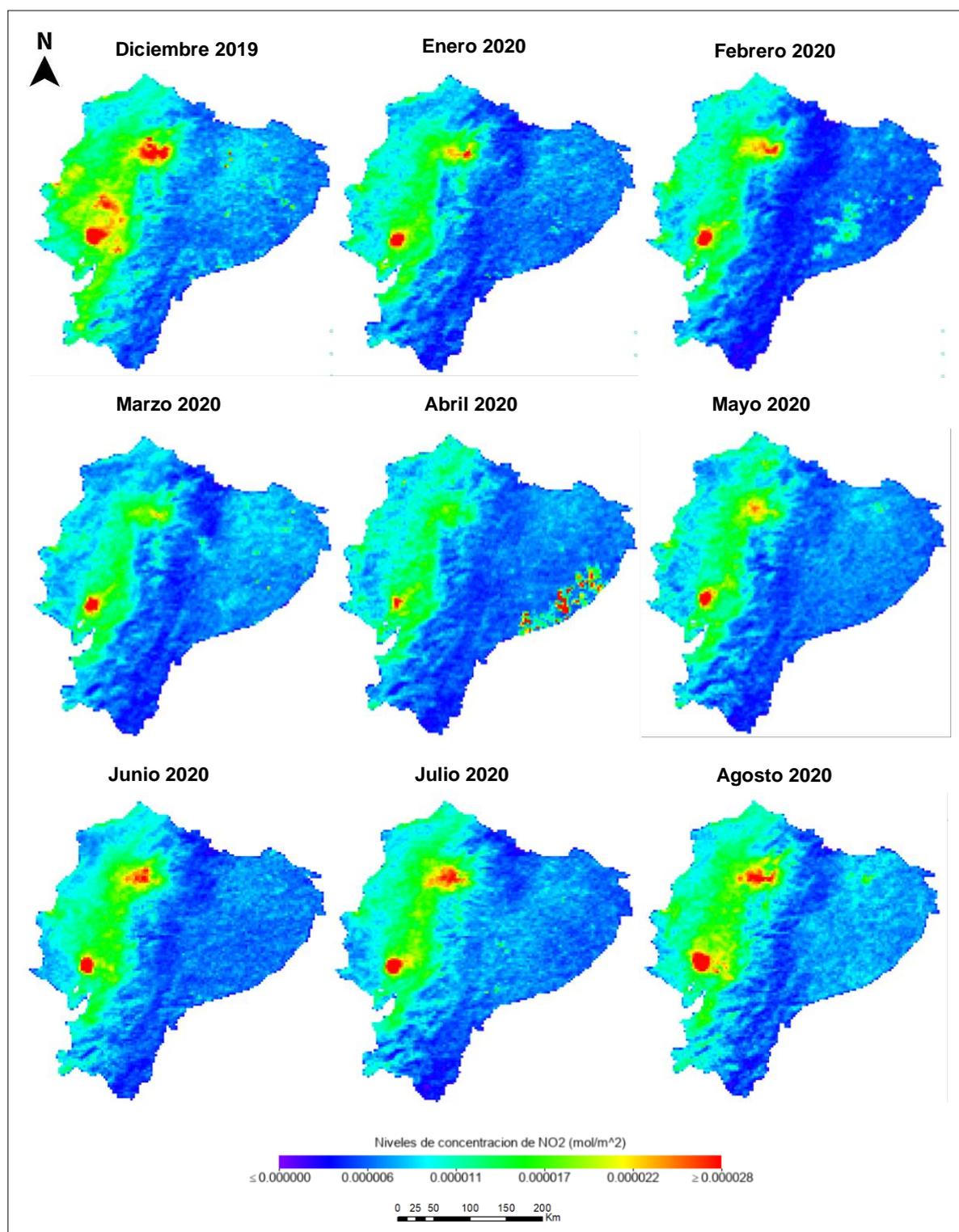
Dióxido de nitrógeno

En la Figura 20 se indica la secuencia de imágenes satelitales promedios mensuales de la columna de dióxido de nitrógeno del satélite Sentinel-5P, la primera imagen hace referencia al mes de diciembre de 2019 y la última imagen al mes de agosto de 2020. En el análisis multitemporal se evidenció cambios espaciotemporales en el NO_2 , donde la característica más significativa fue que, durante la etapa de confinamiento por COVID-19, en los meses de marzo, abril y mayo de 2020 los niveles de concentración de dióxido de nitrógeno disminuyeron significativamente ($p_value < 0.005$) (Anexo A), principalmente en la zona centro y suroeste de la provincia de Pichincha, noreste de la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, y en la zona centro y suroeste de la provincia de Guayas.

De la misma manera, analizando las concentraciones promedios mensuales de dióxido de nitrógeno, en las tres provincias en estudio desde diciembre de 2019 hasta agosto 2020 se determinó que, para el caso de la provincia de Pichincha las concentraciones de NO_2 varían entre $1.10 \cdot 10^{-5} \pm 2.50 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ – $1.95 \cdot 10^{-5} \pm 6.64 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$, en Guayas varían entre $1.82 \cdot 10^{-5} \pm 4.46 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ – $3.48 \cdot 10^{-5} \pm 1.76 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ y finalmente en Santo Domingo de los Tsáchilas las concentraciones de dióxido de nitrógeno varían entre $1.63 \cdot 10^{-5} \pm 1.51 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ – $2.41 \cdot 10^{-5} \pm 2.48 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ como se indica en la Tabla 6.

Figura 20

Análisis multitemporal de NO₂ en el Ecuador Continental.



Nota. (Autora, 2021).

Tabla 6

Concentraciones de NO₂ para el periodo: diciembre de 2019-agosto de 2020.

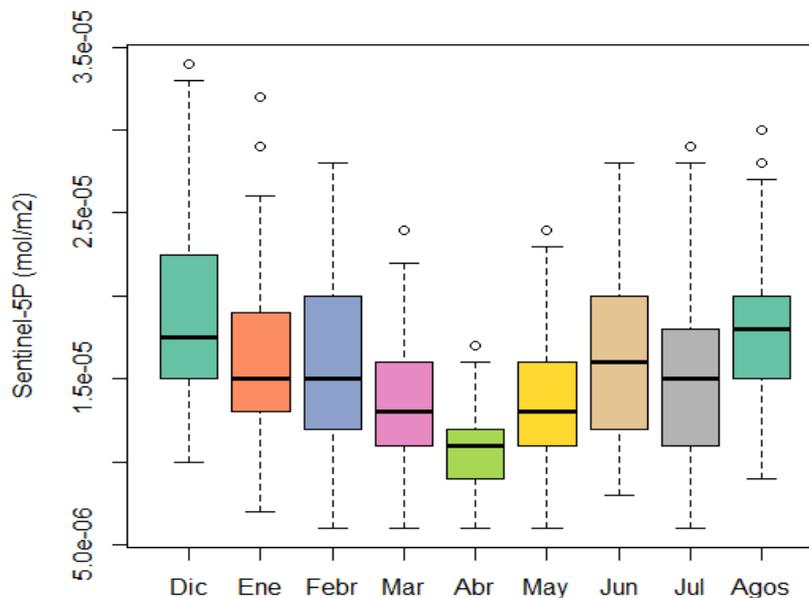
Mes	Dióxido de nitrógeno (mol/m ²)		
	Santo Domingo de los Tsáchilas (n=37)	Guayas (n=68)	Pichincha (n=142)
Diciembre	2.29 *10 ⁻⁵ ± 3.03*10 ⁻⁶	3.01*10 ⁻⁵ ± 9.81*10 ⁻⁶	1.95*10 ⁻⁵ ± 6.64*10 ⁻⁶
Enero	1.90*10 ⁻⁵ ± 2.35*10 ⁻⁶	2.45*10 ⁻⁵ ± 8.58*10 ⁻⁶	1.58*10 ⁻⁵ ± 4.66*10 ⁻⁶
Febrero	2.03*10 ⁻⁵ ± 2.19*10 ⁻⁶	2.65*10 ⁻⁵ ± 9.92*10 ⁻⁶	1.60*10 ⁻⁵ ± 5.28*10 ⁻⁶
Marzo	1.71*10 ⁻⁵ ± 1.74*10 ⁻⁶	2.24*10 ⁻⁵ ± 8.57*10 ⁻⁶	1.34*10 ⁻⁵ ± 3.65*10 ⁻⁶
Abril	1.63*10 ⁻⁵ ± 1.51*10 ⁻⁶	1.82*10 ⁻⁵ ± 4.46*10 ⁻⁶	1.10*10 ⁻⁵ ± 2.50*10 ⁻⁶
Mayo	2.12*10 ⁻⁵ ± 2.36*10 ⁻⁶	2.20*10 ⁻⁵ ± 7.41*10 ⁻⁶	1.34*10 ⁻⁵ ± 3.68*10 ⁻⁶
Junio	2.41*10 ⁻⁵ ± 2.48*10 ⁻⁶	2.73*10 ⁻⁵ ± 1.03*10 ⁻⁵	1.64*10 ⁻⁵ ± 5.37*10 ⁻⁶
Julio	2.31*10 ⁻⁵ ± 2.57*10 ⁻⁶	2.44*10 ⁻⁵ ± 9.30*10 ⁻⁶	1.49*10 ⁻⁵ ± 4.72*10 ⁻⁶
Agosto	2.37*10 ⁻⁵ ± 3.51*10 ⁻⁶	3.48*10 ⁻⁵ ± 1.76*10 ⁻⁵	1.78*10 ⁻⁵ ± 4.60*10 ⁻⁶

Nota. Las concentraciones de NO₂ se expresan como media ± desviación estándar (Autora, 2021).

En el mismo contexto, se determinó que, en la provincia de Pichincha la característica más significativa fue que en los meses de marzo, abril y mayo de 2020 existió una reducción significativa ($p_value < 0.005$) (Anexo A) en las concentraciones promedios mensuales de dióxido de nitrógeno (Figura 21, Tabla 6), lo cual corresponde al periodo durante el confinamiento por COVID-19, asimismo se puede observar que, al comparar los periodos; antes, durante y después del confinamiento por COVID-19 (Figura 22, Tabla 7), las concentraciones de dióxido de nitrógeno de la etapa antes del confinamiento con una concentración de $1.71*10^{-5} \pm 5.83*10^{-6} \frac{mol}{m^2}$ y después del confinamiento con una concentración de $1.64*10^{-5} \pm 5.03*10^{-6} \frac{mol}{m^2}$ fueron significativamente más altos ($p_value < 0.005$) (Anexo A) que durante el confinamiento por COVID-19 con una concentración de $1.26*10^{-5} \pm 3.51*10^{-6} \frac{mol}{m^2}$.

Figura 21

Concentraciones de NO_2 para Pichincha en el período: diciembre 2019-agosto 2020.



Nota. (Autora, 2021).

Tabla 7

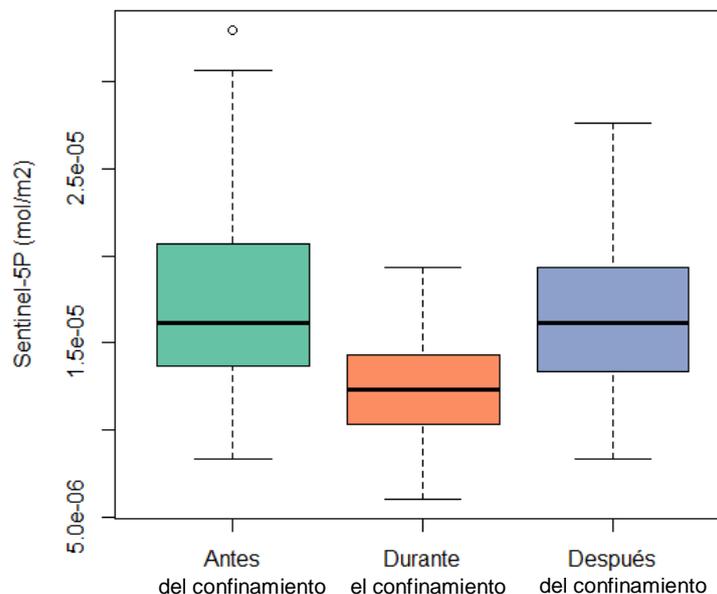
Concentraciones de NO_2 para los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).

Provincia	Dióxido de nitrógeno (mol/m^2)		
	Antes del confinamiento	Durante el confinamiento	Después del confinamiento
Santo Domingo de los Tsáchilas (n= 111)	$2.07 \cdot 10^{-5} \pm 2.99 \cdot 10^{-6}$ ($1.40 \cdot 10^{-5} - 3.10 \cdot 10^{-5}$)	$1.82 \cdot 10^{-5} \pm 2.86 \cdot 10^{-6}$ ($1.30 \cdot 10^{-5} - 2.60 \cdot 10^{-5}$)	$2.36 \cdot 10^{-5} \pm 2.89 \cdot 10^{-6}$ ($1.70 \cdot 10^{-5} - 3.00 \cdot 10^{-5}$)
Guayas (n=204)	$2.70 \cdot 10^{-5} \pm 9.69 \cdot 10^{-6}$ ($1.10 \cdot 10^{-5} - 6.40 \cdot 10^{-5}$)	$2.09 \cdot 10^{-5} \pm 7.25 \cdot 10^{-6}$ ($1.00 \cdot 10^{-5} - 5.00 \cdot 10^{-5}$)	$2.88 \cdot 10^{-5} \pm 1.36 \cdot 10^{-5}$ ($1.20 \cdot 10^{-5} - 9.00 \cdot 10^{-5}$)
Pichincha (n=426)	$1.71 \cdot 10^{-5} \pm 5.83 \cdot 10^{-6}$ ($6.00 \cdot 10^{-6} - 5.20 \cdot 10^{-5}$)	$1.26 \cdot 10^{-5} \pm 3.51 \cdot 10^{-6}$ ($6.00 \cdot 10^{-6} - 2.40 \cdot 10^{-5}$)	$1.64 \cdot 10^{-5} \pm 5.03 \cdot 10^{-6}$ ($6.00 \cdot 10^{-6} - 3.00 \cdot 10^{-5}$)

Nota. Las concentraciones de NO_2 se expresan como media \pm desviación estándar, (Autora, 2021).

Figura 22

Concentraciones de NO_2 para Pichincha en los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).

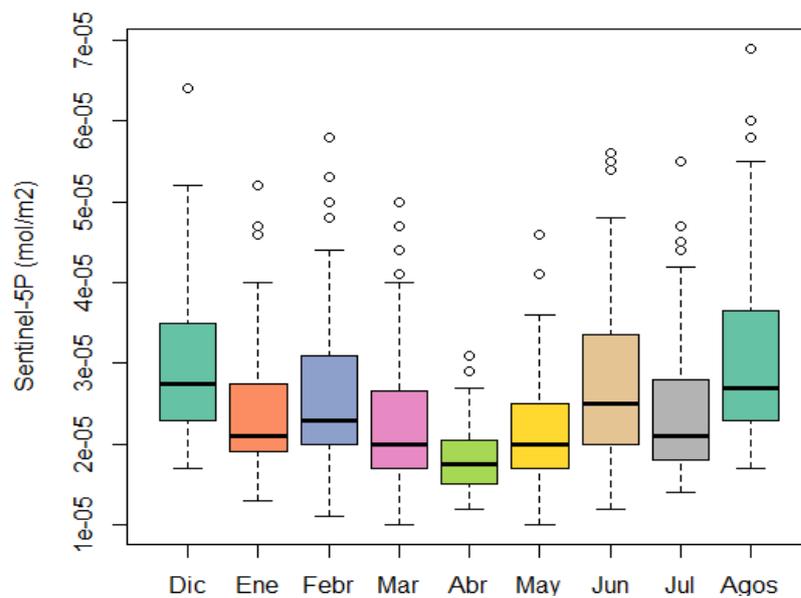


Nota. (Autora, 2021).

De la misma manera, en la provincia de Guayas en los meses de marzo, abril y mayo de 2020 se observa una disminución significativa ($p_value < 0.005$) (Anexo A) en las concentraciones promedios mensuales de dióxido de nitrógeno (Figura 23, Tabla 6), correspondiendo a la etapa durante el confinamiento por COVID-19, además se observa que las concentraciones de dióxido de nitrógeno durante el confinamiento con una concentración de $2.09 \cdot 10^{-5} \pm 7.25 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ fueron significativamente más bajas ($p_value < 0.005$) (Anexo A) que antes del confinamiento con una concentración de $2.70 \cdot 10^{-5} \pm 9.69 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ y después del confinamiento con una concentración de dióxido de nitrógeno de $2.88 \cdot 10^{-5} \pm 1.36 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ (Figura 24, Tabla 7).

Figura 23

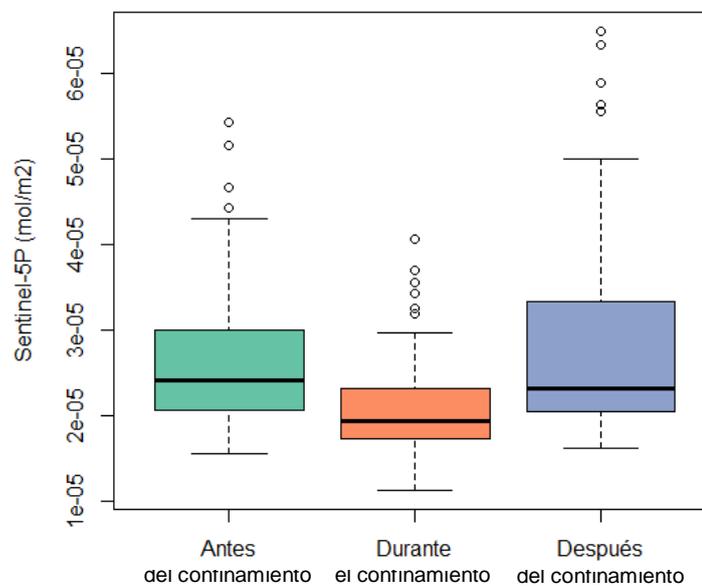
Concentraciones de NO_2 para Guayas en el periodo: diciembre 2019-agosto 2020.



Nota. (Autora, 2021).

Figura 24

Concentraciones de NO_2 para Guayas en los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).

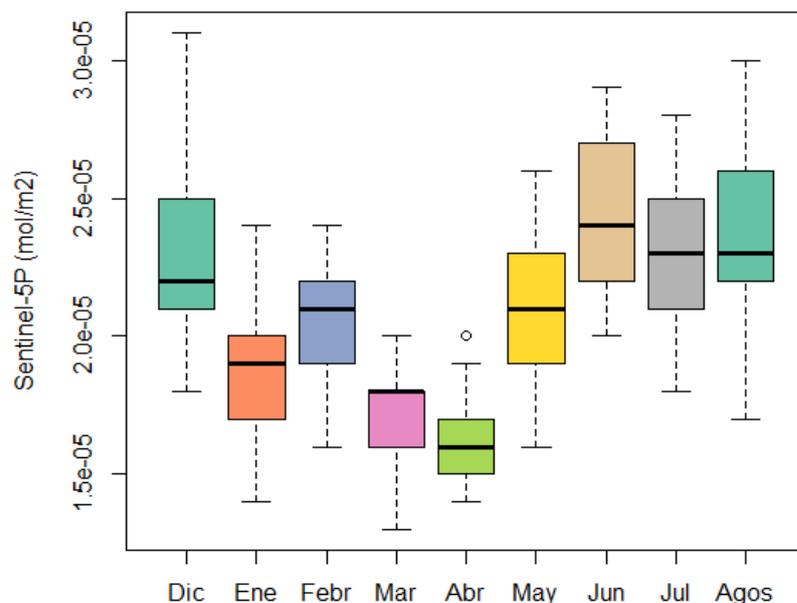


Nota. (Autora, 2021).

Finalmente, en la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas las concentraciones promedio mensuales de dióxido de nitrógeno, de los meses de marzo y abril de 2020, mostraron una disminución significativa ($p_value < 0.005$) (Anexo A) en relación a los demás meses en estudio (Figura 25, Tabla 6), igualmente al comparar las concentraciones de dióxido de nitrógeno en función de las tres etapas; antes del confinamiento con una concentración de $2.07 \cdot 10^{-5} \pm 2.99 \cdot 10^{-6} \frac{mol}{m^2}$, durante el confinamiento con una concentración de $1.82 \cdot 10^{-5} \pm 2.86 \cdot 10^{-6} \frac{mol}{m^2}$ y después del confinamiento con una concentración de $2.36 \cdot 10^{-5} \pm 2.89 \cdot 10^{-6} \frac{mol}{m^2}$, se observa que las concentraciones de dióxido de nitrógeno en la etapa durante el confinamiento presentaron una reducción significativa ($p_value < 0.005$) (Anexo A) en relación a los periodos antes de confinamiento y durante el confinamiento (Figura 26, Tabla 7).

Figura 25

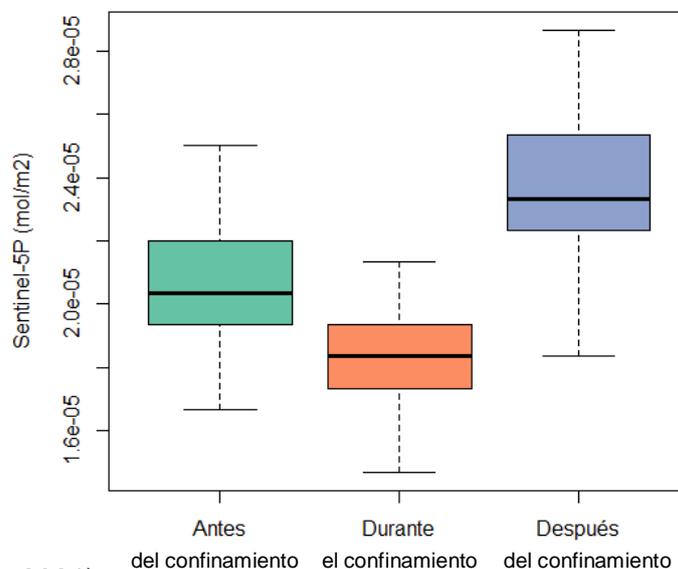
Concentraciones de NO_2 para Santo Domingo de los Tsáchilas en el periodo: diciembre 2019-agosto 2020.



Nota. (Autora, 2021).

Figura 26

Concentraciones de NO_2 para Santo Domingo de los Tsáchilas en los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).

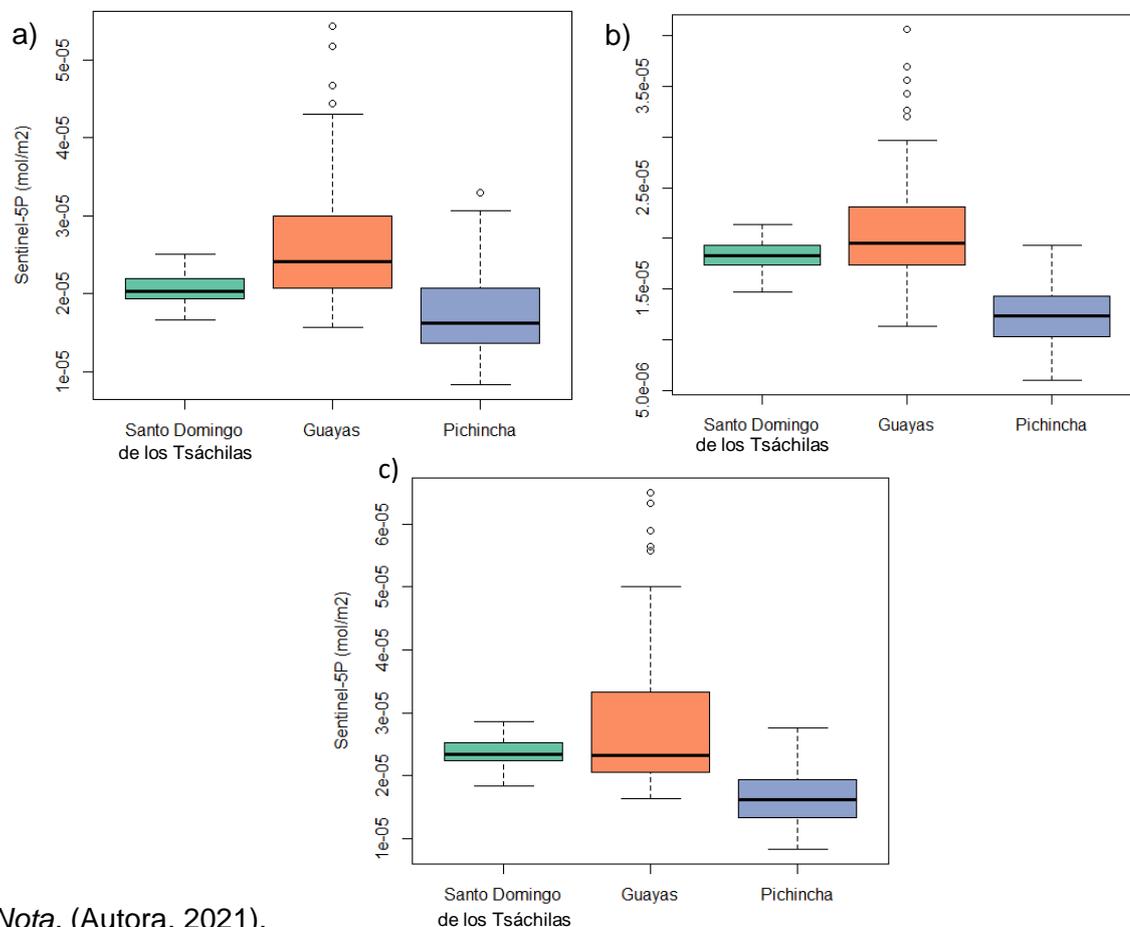


Nota. (Autora, 2021).

Finalmente, al comparar las concentraciones de dióxido de nitrógeno entre las tres provincias en estudio, Pichincha, Guayas y Santo Domingo de los Tsáchilas, en función de los tres periodos; antes, durante y después del confinamiento por COVID-19 (Figura 27), se observa que antes, durante y después del confinamiento las concentraciones de dióxido de nitrógeno en Pichincha fueron significativamente más bajas ($p_value < 0.005$) (Anexo B) que, las provincias de Guayas y Santo Domingo de los Tsáchilas. Por otro lado, en Guayas se observa que antes del confinamiento las concentraciones de dióxido de nitrógeno son significativamente más altas ($p_value < 0.005$) (Anexo B) que, Santo Domingo de los Tsáchilas, sin embargo, al comparar las concentraciones de NO_2 en las etapas durante y después del confinamiento se observa que las provincias de Guayas y Santo Domingo de los Tsáchilas no presentaron una variación significativa ($p_value > 0.005$) (Anexo B).

Figura 27

Concentraciones de NO_2 en los tres periodos: a) antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), b) durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y c) después del confinamiento (mayo-agosto 2020).



Nota. (Autora, 2021).

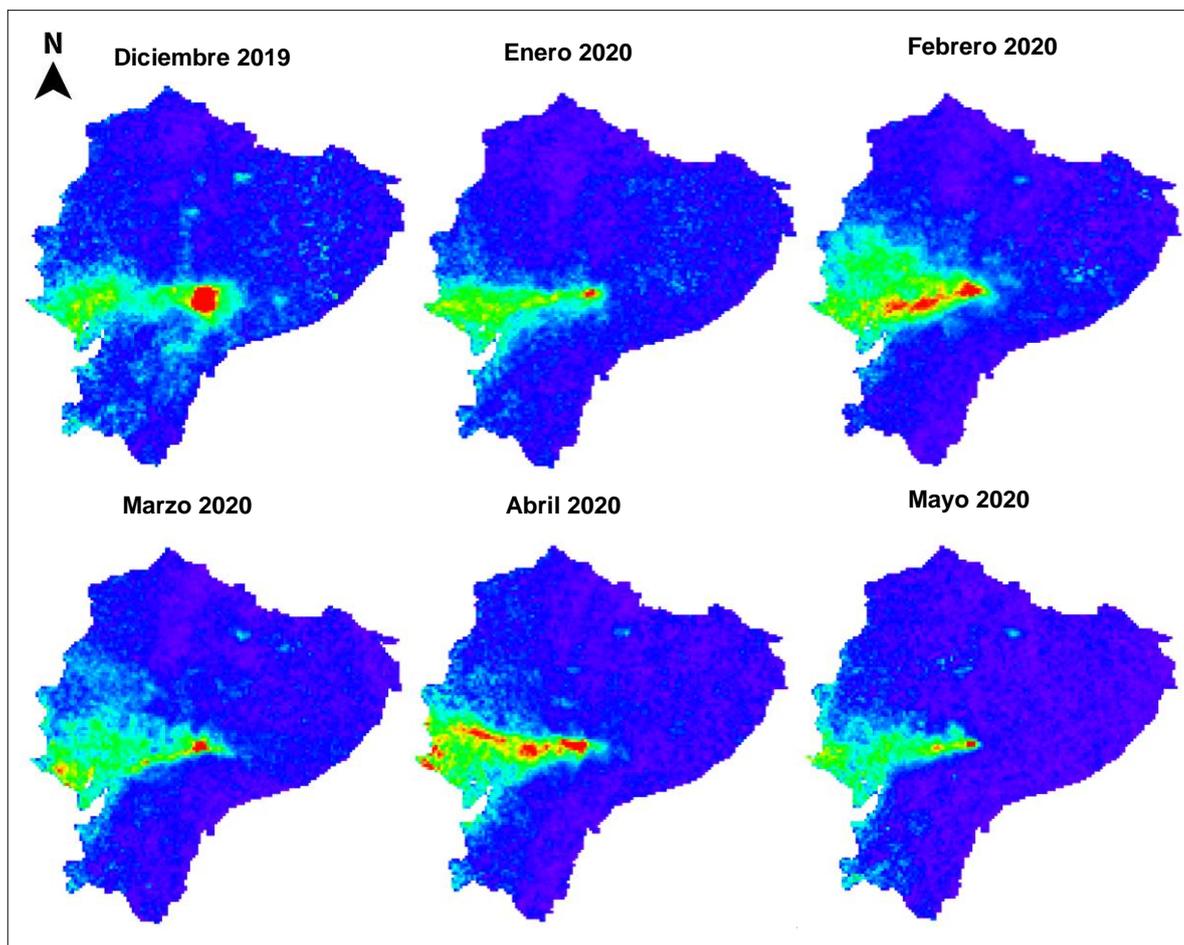
Dióxido de azufre

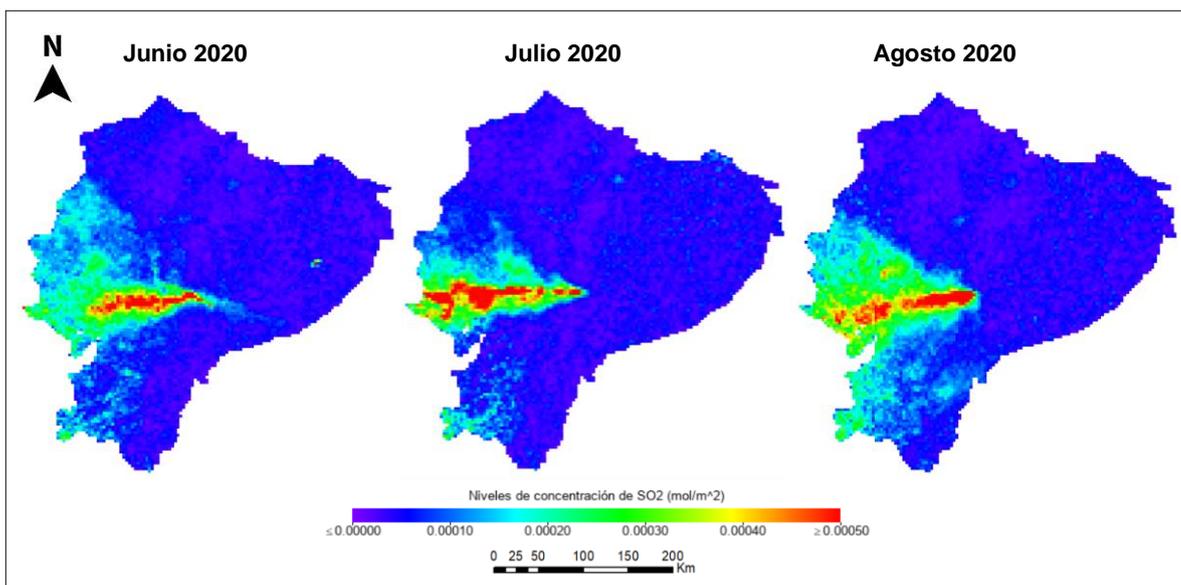
En la Figura 28 se indica la distribución espacio-temporal de imágenes promedios mensuales de la columna de dióxido de azufre del satélite Sentinel-5P, desde diciembre de 2019 hasta agosto de 2020. En la secuencia de imágenes la primera hace referencia al mes de diciembre de 2019 y la última al mes de agosto de 2020. En el análisis multitemporal de la columna de SO_2 en la etapa durante el confinamiento, en los meses de marzo, abril y mayo de 2020, se evidenció cambios espacio-temporales en las concentraciones de dióxido de azufre, principalmente en las provincias de Morona Santiago, Chimborazo, Guayas y Santa Elena.

De la misma manera, analizando las concentraciones promedios mensuales de SO_2 , en las cuatro provincias en estudio y el Distrito Metropolitano de Quito se determinó que, para el caso de la provincia de Morona Santiago las concentraciones de SO_2 varían entre $9.66 \cdot 10^{-5} \pm 1.40 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2} - 5.86 \cdot 10^{-4} \pm 1.82 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$, en Chimborazo varían entre $2.30 \cdot 10^{-4} \pm 4.24 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2} - 6.38 \cdot 10^{-4} \pm 1.79 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$, en Guayas varían entre $2.01 \cdot 10^{-4} \pm 4.79 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2} - 4.12 \cdot 10^{-4} \pm 1.26 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$, en Santa Elena varían entre $1.94 \cdot 10^{-4} \pm 5.14 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2} - 4.37 \cdot 10^{-4} \pm 1.50 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ y finalmente en el Distrito Metropolitano de Quito varían entre $2.84 \cdot 10^{-5} \pm 1.10 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2} - 4.33 \cdot 10^{-5} \pm 1.82 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ como se indica en la Tabla 8.

Figura 28

Análisis multitemporal de SO_2 en el Ecuador Continental.





Nota. (Autora, 2021).

Tabla 8

Concentraciones de SO₂ para el periodo: diciembre de 2019-agosto de 2020.

Mes	Dióxido de azufre (mol/m ²)				
	Santa Elena (n=73)	Morona Santiago (n=71)	Guayas (n=187)	DMQ (n=142)	Chimborazo (n=40)
Diciembre	$1.94 \cdot 10^{-4} \pm 5.14 \cdot 10^{-5}$	$5.86 \cdot 10^{-4} \pm 1.82 \cdot 10^{-4}$	$2.09 \cdot 10^{-4} \pm 5.21 \cdot 10^{-5}$	$4.33 \cdot 10^{-5} \pm 1.82 \cdot 10^{-5}$	$2.30 \cdot 10^{-4} \pm 4.24 \cdot 10^{-5}$
Enero	$3.09 \cdot 10^{-4} \pm 4.09 \cdot 10^{-5}$	$2.12 \cdot 10^{-4} \pm 1.26 \cdot 10^{-4}$	$2.49 \cdot 10^{-4} \pm 6.56 \cdot 10^{-5}$	$3.51 \cdot 10^{-5} \pm 1.66 \cdot 10^{-5}$	$2.92 \cdot 10^{-4} \pm 7.92 \cdot 10^{-5}$
Febrero	$2.72 \cdot 10^{-4} \pm 4.25 \cdot 10^{-5}$	$2.10 \cdot 10^{-4} \pm 1.61 \cdot 10^{-4}$	$3.09 \cdot 10^{-4} \pm 1.09 \cdot 10^{-4}$	$2.84 \cdot 10^{-5} \pm 1.10 \cdot 10^{-5}$	$4.45 \cdot 10^{-4} \pm 8.15 \cdot 10^{-5}$
Marzo	$2.55 \cdot 10^{-4} \pm 7.81 \cdot 10^{-5}$	$1.99 \cdot 10^{-4} \pm 2.22 \cdot 10^{-4}$	$2.19 \cdot 10^{-4} \pm 4.55 \cdot 10^{-5}$	$3.23 \cdot 10^{-5} \pm 1.28 \cdot 10^{-5}$	$2.52 \cdot 10^{-4} \pm 7.51 \cdot 10^{-5}$
Abril	$3.31 \cdot 10^{-4} \pm 7.61 \cdot 10^{-5}$	$2.08 \cdot 10^{-4} \pm 1.80 \cdot 10^{-4}$	$3.40 \cdot 10^{-4} \pm 7.61 \cdot 10^{-5}$	$3.32 \cdot 10^{-5} \pm 1.19 \cdot 10^{-5}$	$4.53 \cdot 10^{-4} \pm 9.88 \cdot 10^{-5}$
Mayo	$2.68 \cdot 10^{-4} \pm 5.59 \cdot 10^{-5}$	$9.66 \cdot 10^{-5} \pm 1.40 \cdot 10^{-4}$	$2.01 \cdot 10^{-4} \pm 4.79 \cdot 10^{-5}$	$3.93 \cdot 10^{-5} \pm 1.76 \cdot 10^{-5}$	$3.35 \cdot 10^{-4} \pm 6.50 \cdot 10^{-5}$
Junio	$2.12 \cdot 10^{-4} \pm 4.14 \cdot 10^{-5}$	$1.87 \cdot 10^{-4} \pm 1.88 \cdot 10^{-4}$	$3.22 \cdot 10^{-4} \pm 1.18 \cdot 10^{-4}$	$3.36 \cdot 10^{-5} \pm 1.29 \cdot 10^{-5}$	$4.24 \cdot 10^{-4} \pm 1.16 \cdot 10^{-4}$
Julio	$4.37 \cdot 10^{-4} \pm 1.50 \cdot 10^{-4}$	$1.02 \cdot 10^{-4} \pm 1.54 \cdot 10^{-4}$	$4.12 \cdot 10^{-4} \pm 1.26 \cdot 10^{-4}$	$3.84 \cdot 10^{-5} \pm 1.51 \cdot 10^{-5}$	$3.98 \cdot 10^{-4} \pm 9.48 \cdot 10^{-5}$
Agosto	$3.23 \cdot 10^{-4} \pm 6.64 \cdot 10^{-5}$	$2.30 \cdot 10^{-4} \pm 2.86 \cdot 10^{-4}$	$3.47 \cdot 10^{-4} \pm 8.80 \cdot 10^{-5}$	$3.47 \cdot 10^{-5} \pm 1.35 \cdot 10^{-5}$	$6.38 \cdot 10^{-4} \pm 1.79 \cdot 10^{-4}$

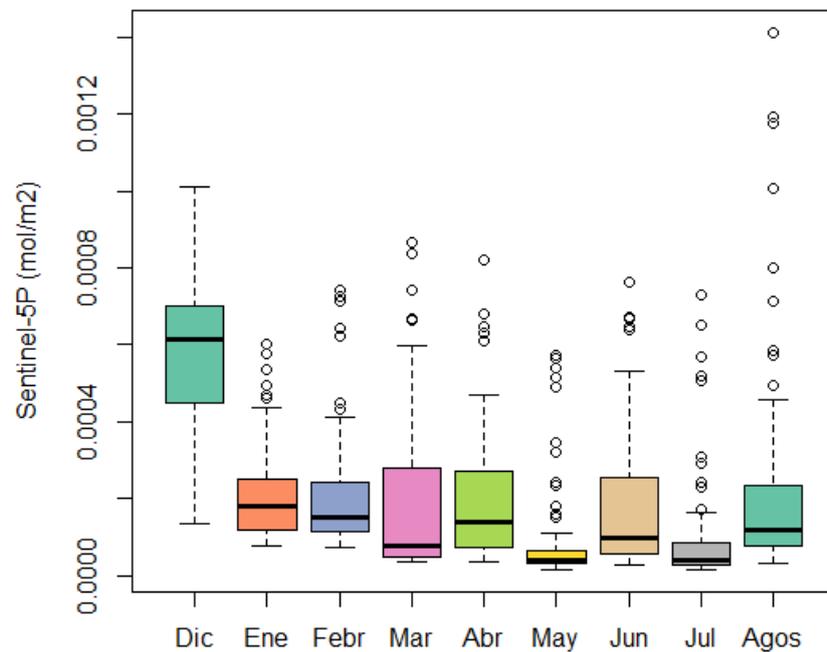
Nota. Las concentraciones de SO₂ se expresan como media \pm desviación estándar, DQM (Distrito Metropolitano de Quito) (Autora, 2020).

De la misma manera, al comparar las concentraciones promedios mensuales de SO₂ se determinó que, en la provincia de Morona Santiago, los meses de mayo y julio de 2020 presentaron una disminución significativa en relación a los demás meses en estudio (Figura 29, Tabla 8). Por otro lado se observa que al comparar las concentraciones de dióxido de azufre de los meses de marzo, abril y mayo de 2020 con los meses de diciembre de 2019, enero y febrero de 2020, se observa que no

presentaron una variación significativa ($p_value > 0.005$) (Anexo C) (Figura 30, Tabla 8) lo cual corresponde a los periodos antes del confinamiento con una concentración de $3.36 \cdot 10^{-4} \pm 2.37 \cdot 10^{-4} \frac{mol}{m^2}$ y durante el confinamiento con una concentración de $1.68 \cdot 10^{-4} \pm 1.90 \cdot 10^{-4} \frac{mol}{m^2}$, asimismo se puede visualizar que, las concentraciones de SO_2 en la etapa después del confinamiento con una concentración de $1.73 \cdot 10^{-4} \pm 2.22 \cdot 10^{-4} \frac{mol}{m^2}$ mostraron una disminución significativa ($p_value < 0.005$) (Anexo C) en relación al periodo antes del confinamiento y después del confinamiento (Figura 30, Tabla 9).

Figura 29

Concentraciones de SO_2 para Morona Santiago en el periodo: diciembre 2019-agosto 2020.



Nota. (Autora, 2021).

Tabla 9

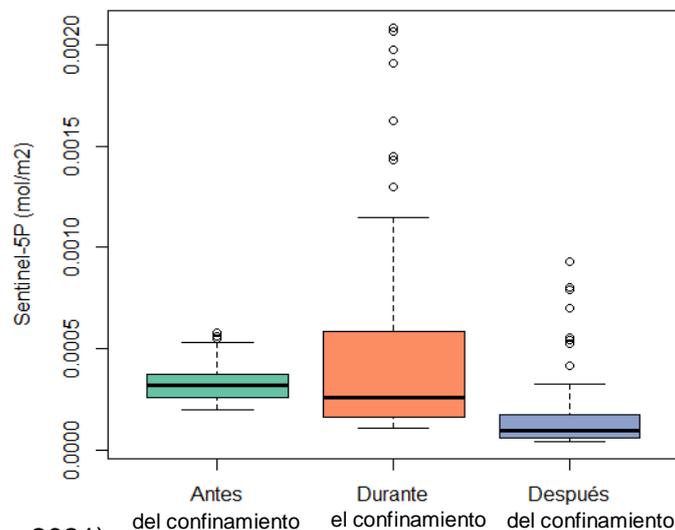
Concentraciones de SO_2 para los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).

Zona de estudio	Dióxido de azufre (mol/m^2)		
	Antes del confinamiento	Durante el confinamiento	Después del confinamiento
Santa Elena (n= 219)	$2.58 \cdot 10^{-4} \pm 6.56 \cdot 10^{-5}$ ($9.30 \cdot 10^{-5} - 4.15 \cdot 10^{-4}$)	$2.85 \cdot 10^{-4} \pm 7.78 \cdot 10^{-5}$ ($1.12 \cdot 10^{-4} - 5.40 \cdot 10^{-4}$)	$3.24 \cdot 10^{-4} \pm 1.34 \cdot 10^{-4}$ ($1.33 \cdot 10^{-4} - 8.19 \cdot 10^{-4}$)
Morona Santiago (n=213)	$3.36 \cdot 10^{-4} \pm 2.37 \cdot 10^{-4}$ ($7.40 \cdot 10^{-5} - 1.01 \cdot 10^{-3}$)	$1.68 \cdot 10^{-4} \pm 1.90 \cdot 10^{-4}$ ($1.50 \cdot 10^{-5} - 8.66 \cdot 10^{-4}$)	$1.73 \cdot 10^{-4} \pm 2.22 \cdot 10^{-4}$ ($1.50 \cdot 10^{-5} - 1.41 \cdot 10^{-3}$)
Guayas (n=561)	$2.56 \cdot 10^{-4} \pm 8.91 \cdot 10^{-5}$ ($6.70 \cdot 10^{-5} - 5.85 \cdot 10^{-4}$)	$2.53 \cdot 10^{-4} \pm 8.48 \cdot 10^{-5}$ ($8.90 \cdot 10^{-5} - 5.56 \cdot 10^{-4}$)	$3.60 \cdot 10^{-4} \pm 1.18 \cdot 10^{-4}$ ($1.24 \cdot 10^{-4} - 6.92 \cdot 10^{-4}$)
DMQ (n=426)	$3.56 \cdot 10^{-5} \pm 1.67 \cdot 10^{-5}$ ($6.00 \cdot 10^{-6} - 1.09 \cdot 10^{-4}$)	$3.49 \cdot 10^{-5} \pm 1.46 \cdot 10^{-5}$ ($8.00 \cdot 10^{-6} - 1.30 \cdot 10^{-4}$)	$3.55 \cdot 10^{-5} \pm 1.40 \cdot 10^{-5}$ ($7.00 \cdot 10^{-6} - 8.60 \cdot 10^{-5}$)
Chimborazo (n=120)	$3.22 \cdot 10^{-4} \pm 1.14 \cdot 10^{-4}$ ($1.30 \cdot 10^{-4} - 7.35 \cdot 10^{-4}$)	$3.47 \cdot 10^{-4} \pm 1.20 \cdot 10^{-4}$ ($1.39 \cdot 10^{-4} - 6.67 \cdot 10^{-4}$)	$4.87 \cdot 10^{-4} \pm 1.72 \cdot 10^{-4}$ ($2.03 \cdot 10^{-4} - 1.13 \cdot 10^{-3}$)

Nota. Las concentraciones de SO_2 se expresan como media \pm desviación estándar, DQM (Distrito Metropolitano de Quito) (Autora, 2021).

Figura 30

Concentraciones de SO_2 para Morona Santiago en los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).

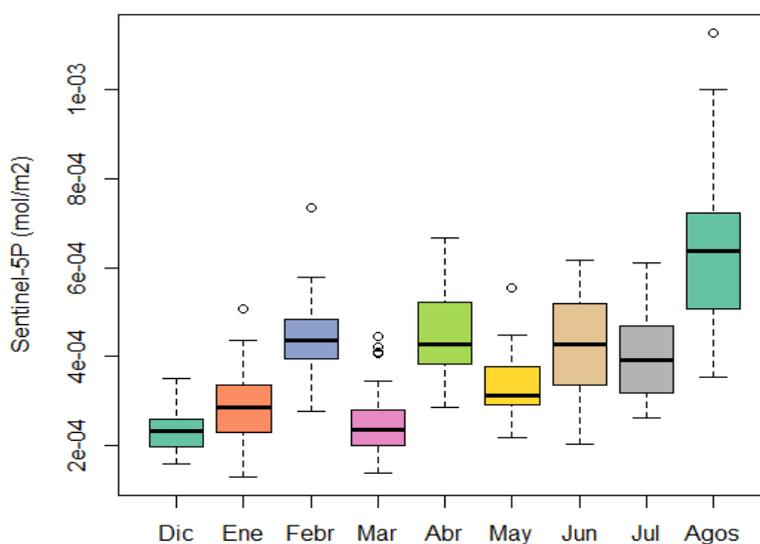


Nota. (Autora, 2021).

De la misma manera, en la provincia de Chimborazo, los meses de diciembre de 2019 y marzo de 2020 presentaron una disminución significativa de las concentraciones de dióxido de azufre en relación a los demás meses en estudio (Figura 31, Tabla 8). Además, al comparar las concentraciones promedios mensuales de SO_2 , de los meses de marzo, abril y mayo de 2020 con los meses de diciembre de 2019, enero y febrero de 2020 se observa que no existieron diferencias significativas ($p_value > 0.005$) (Anexo C) en las concentraciones de SO_2 (Figura 32, Tabla 8), lo cual corresponde a los periodos antes del confinamiento y durante el confinamiento, asimismo se puede observar que, al comparar las concentraciones de SO_2 del periodo después del confinamiento con una concentración de $4.87 \cdot 10^{-4} \pm 1.72 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ con los periodos antes del confinamiento con una concentración de $3.22 \cdot 10^{-4} \pm 1.14 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ y durante el confinamiento con una concentración de $3.47 \cdot 10^{-4} \pm 1.20 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ (Figura 32, Tabla 9), la etapa después del confinamiento presentó diferencias significativamente más altas ($p_value < 0.005$) (Anexo C) en relación a las etapas antes del confinamiento y durante el confinamiento.

Figura 31

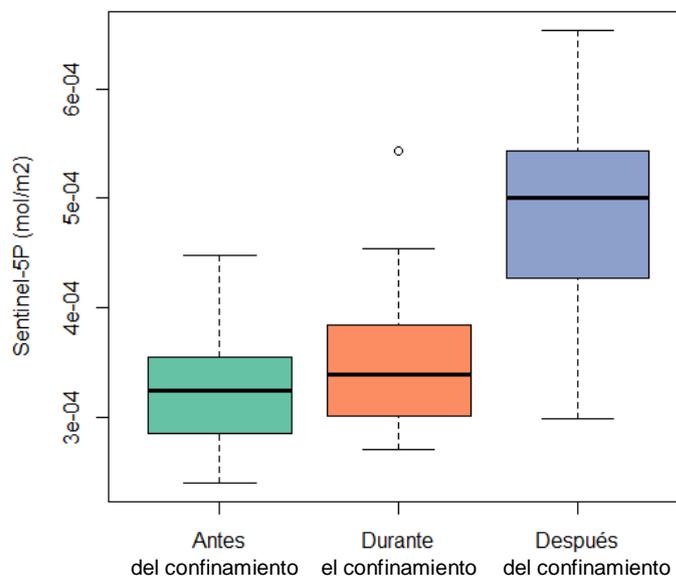
Concentraciones de SO_2 para Chimborazo en el periodo: diciembre 2019-agosto 2020.



Nota. (Autora, 2021).

Figura 32

Concentraciones de SO_2 para Chimborazo en los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).



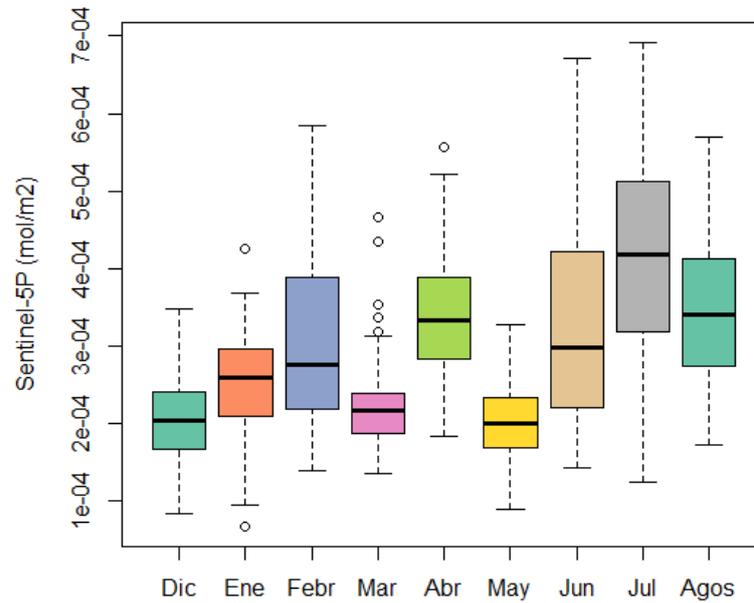
Nota. (Autora, 2021).

Asimismo, en la provincia de Guayas, se determinó que, los meses de diciembre de 2019, marzo y mayo de 2020 presentaron una disminución significativa de las concentraciones de dióxido de azufre en relación a los demás meses en estudio (Figura 33, Tabla 8). Por otro lado, al comparar las concentraciones promedios mensuales de dióxido de azufre, de los meses de marzo, abril y mayo de 2020 con los meses de diciembre de 2019, enero y febrero de 2020, se observa que no existió una variación significativa ($p_value > 0.005$) (Anexo 3) en las concentraciones de SO_2 , (Figura 34, Tabla 8), lo cual corresponde a los periodos antes del confinamiento con una concentración de $2.56 \cdot 10^{-4} \pm 8.91 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ y durante el confinamiento, con una concentración de $2.53 \cdot 10^{-4} \pm 8.48 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ asimismo se puede observar que las concentraciones de SO_2 en la etapa después del confinamiento con una concentración de $3.60 \cdot 10^{-4} \pm 1.18 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ fueron

significativamente más altas ($p_value < 0.005$) (Anexo C) que las etapas antes del confinamiento y durante del confinamiento (Figura 34, Tabla 9).

Figura 33

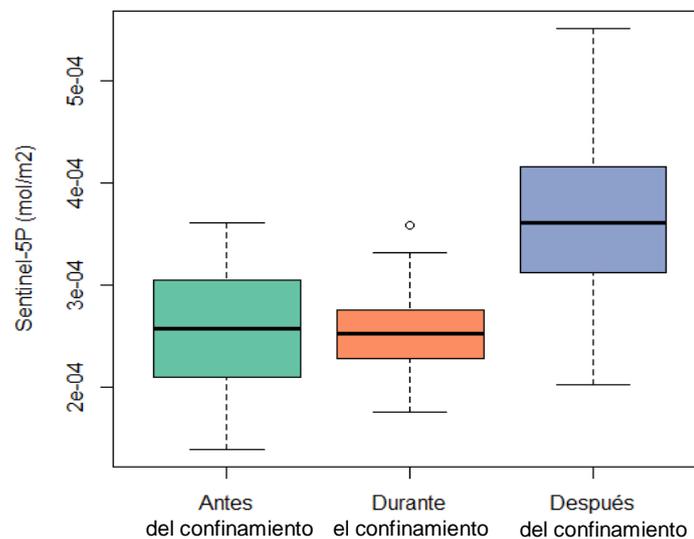
Concentraciones de SO₂ para Guayas en el periodo: diciembre 2019-agosto 2020.



Nota. (Autora, 2021).

Figura 34

Concentraciones de SO₂ para Guayas en los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).

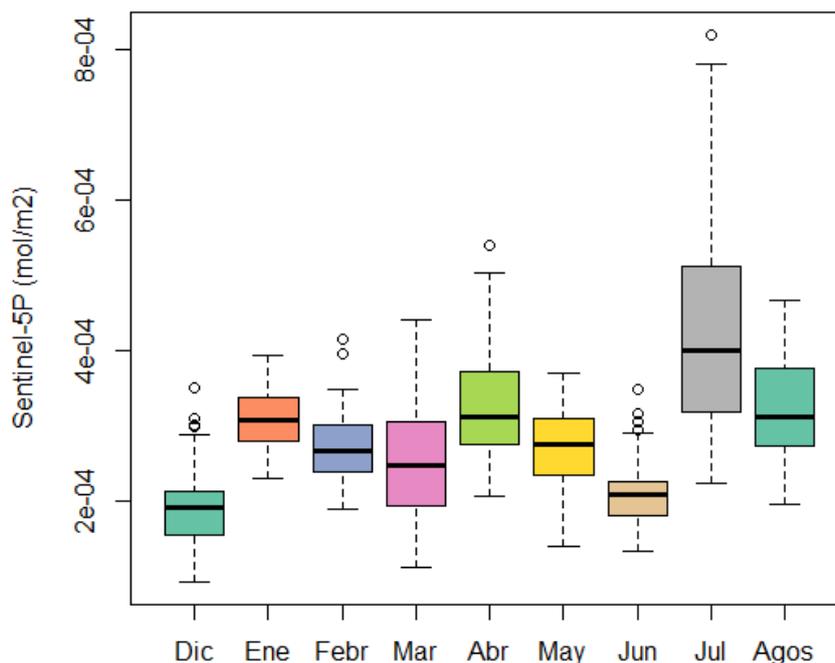


Nota. (Autora, 2021).

Por otro lado, en la provincia de Santa Elena, se determinó que, los meses de diciembre de 2019, y junio de 2020 presentaron una disminución significativa de las concentraciones de dióxido de azufre en relación a los demás meses en estudio (Figura 35, Tabla 8). Además, se observa que las concentraciones de dióxido de azufre del periodo después del confinamiento con una concentración de $3.24 \cdot 10^{-4} \pm 1.34 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ presentaron un aumento significativo ($p_value < 0.005$) (Anexo C), con relación a la etapa antes del confinamiento con una concentración de $2.58 \cdot 10^{-4} \pm 6.56 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ y durante el confinamiento con una concentración de $2.85 \cdot 10^{-4} \pm 7.78 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ (Figura 36, Tabla 9), igualmente la etapa durante el confinamiento presentó un aumento significativo ($p_value < 0.005$) (Anexo C), en las concentraciones de dióxido de azufre en relación a la etapa antes del confinamiento (Figura 36, Tabla 9).

Figura 35

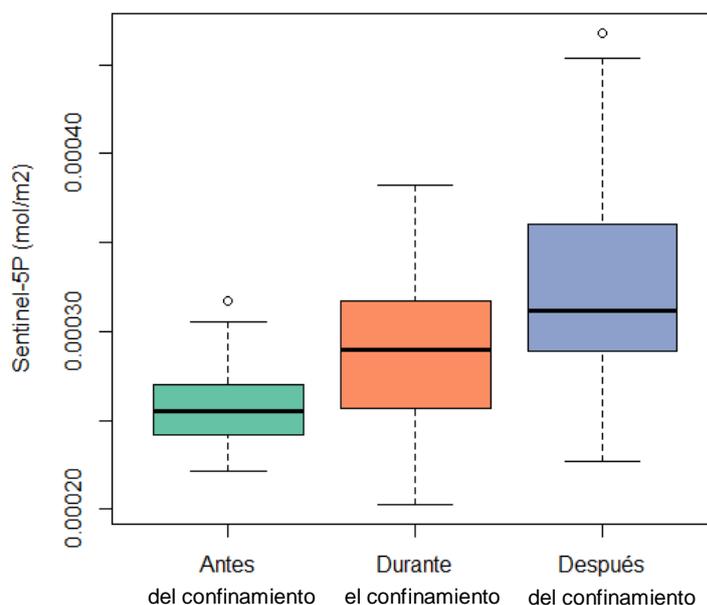
Concentraciones de SO_2 para Santa Elena en el periodo: diciembre 2019-agosto 2020.



Nota. (Autora, 2021).

Figura 36

Concentraciones de SO_2 para Santa Elena en los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).

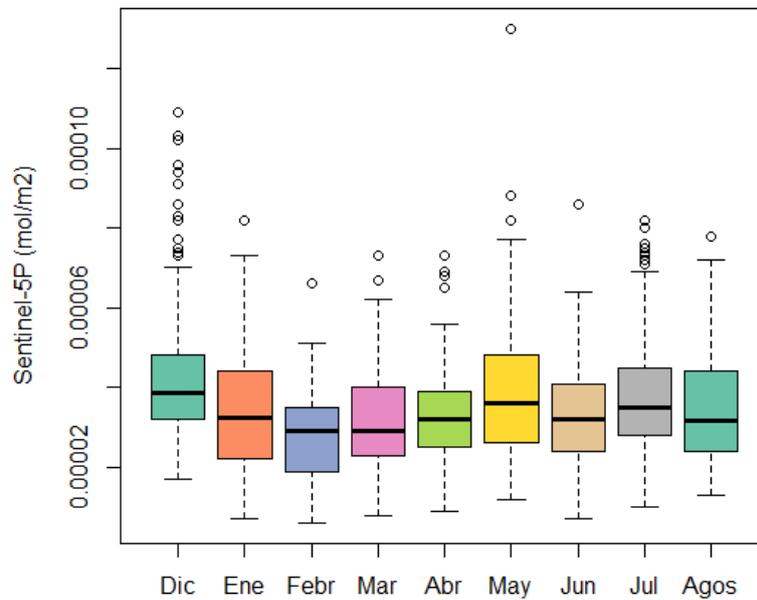


Nota. (Autora, 2021).

Finalmente, en el Distrito Metropolitano de Quito la característica más significativa fue que, el mes de febrero de 2020 presentó una disminución significativa en las concentraciones de dióxido de azufre en relación a los demás meses en estudio (Figura 37, Tabla 8). Por otro lado se puede observar que, al comparar las concentraciones de dióxido de azufre correspondientes a los tres periodos analizados; antes durante y después de confinamiento por COVID-19, las etapas antes del confinamiento con una concentración de $3.56 \cdot 10^{-5} \pm 1.67 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ y después del confinamiento con una concentración de $3.55 \cdot 10^{-5} \pm 1.40 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ fueron significativamente más altos ($p_value < 0.005$) (Anexo C) que durante el confinamiento con una concentración de $3.49 \cdot 10^{-4} \pm 1.46 \cdot 10^{-5} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ (Figura 38, Tabla 9).

Figura 37

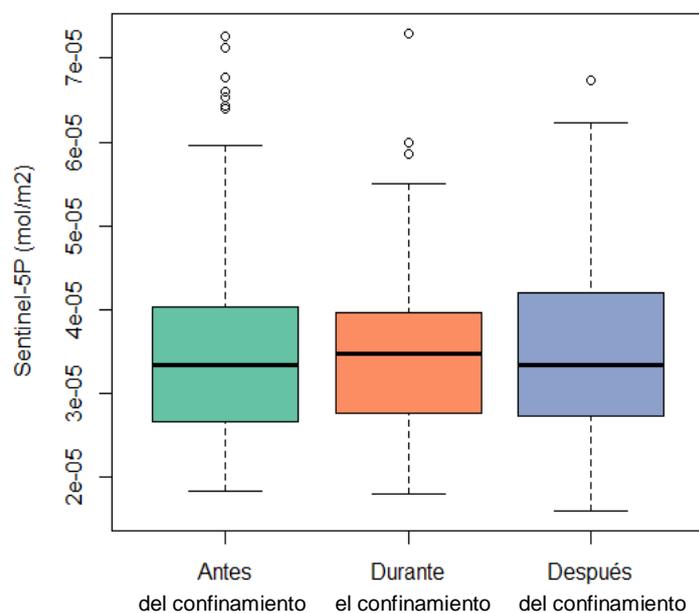
Concentraciones de SO_2 para el Distrito Metropolitano de Quito en el periodo: diciembre 2019-agosto 2020.



Nota. (Autora, 2021).

Figura 38

Concentraciones de SO_2 para el Distrito Metropolitano de Quito en los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).

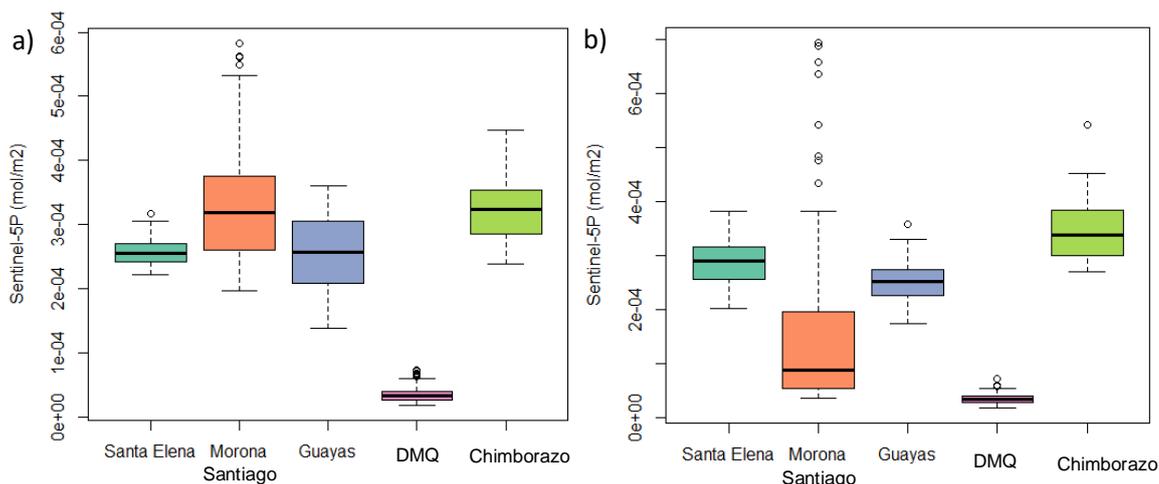


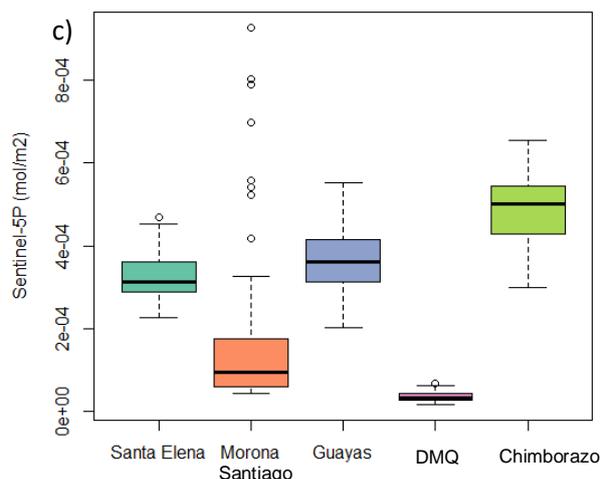
Nota. (Autora, 2021).

Por otro lado, al comparar las concentraciones de dióxido de azufre entre las cuatro provincias en estudio y el Distrito Metropolitano de Quito, en función de los tres periodos; antes, durante y después del confinamiento (Figura 39) se observa que, antes, durante y después del confinamiento por COVID-19, las concentraciones de SO₂ del Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) fueron significativamente más bajas ($p_value < 0.005$) (Anexo D) que las concentraciones de SO₂ de Morona Santiago, Chimborazo, Guayas y Santa Elena. De la misma manera se visualiza que, la provincia de Morona Santiago, en la etapa antes del confinamiento presentó concentraciones de dióxido de azufre significativamente más altas ($p_value < 0.005$) (Anexo D) que, Guayas, Santa Elena y el Distrito Metropolitano de Quito, sin embargo, al comparar con la provincia de Chimborazo se observa que las concentraciones de SO₂ no presentaron una variación significativa ($p_value > 0.005$) (Anexo D) en la etapa antes del confinamiento. Además, se observa que las concentraciones de dióxido de azufre de la provincia de Chimborazo aumentaron significativamente ($p_value < 0.005$) (Anexo D) en los periodos durante el confinamiento y después del confinamiento, en relación a las provincias de Guayas, Chimborazo, Morona Santiago, Santa Elena y el Distrito Metropolitano de Quito.

Figura 39

Concentraciones de SO₂ en los tres periodos: a) antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), b) durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y c) después del confinamiento (mayo-agosto 2020).





Nota. (Autora, 2021).

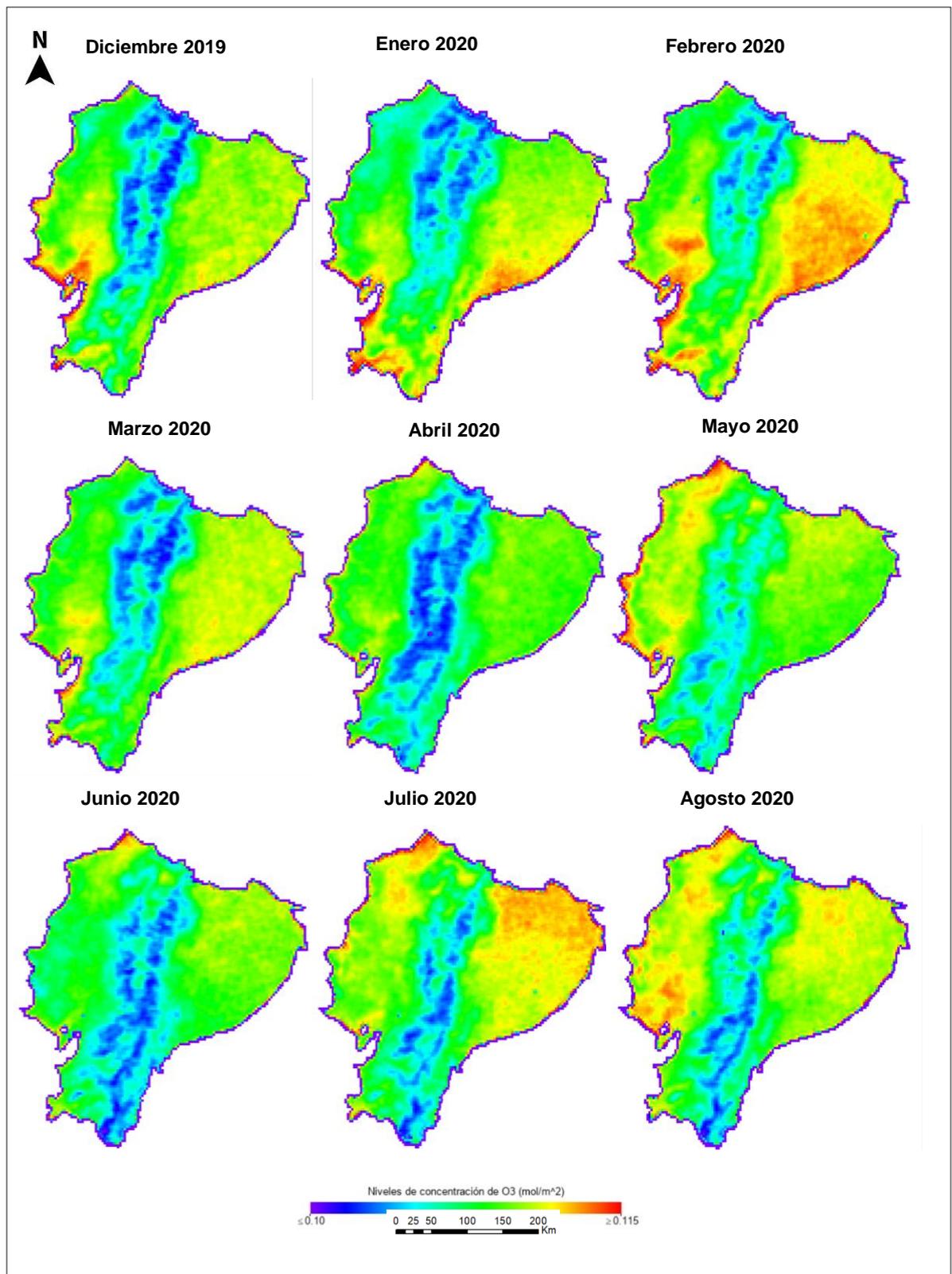
Ozono

En la Figura 40 se indica la secuencia de imágenes satelitales de la columna de O_3 del satélite Sentinel-5P, donde se evidenció la variación espacio-temporal del ozono en el Ecuador Continental desde el 1 diciembre de 2019 hasta el 31 de agosto de 2020. En la secuencia de imágenes satelitales la primera hace referencia al mes de diciembre de 2019 y la última al mes de agosto del 2020. En el análisis multitemporal de la columna de O_3 se evidenció cambios espacio-temporales en las concentraciones promedios mensuales de ozono, principalmente en las provincias de Sucumbíos, Pastaza y Guayas.

De la misma manera, analizando las concentraciones promedios mensuales de O_3 , en las tres provincias en estudio y el Distrito Metropolitano de Quito, desde diciembre de 2019 hasta agosto de 2020 se determinó que, para la provincia de Guayas las concentraciones de O_3 varían entre $1.08 \cdot 10^{-1} \pm 1.45 \cdot 10^{-4} \frac{mol}{m^2} - 1.21 \cdot 10^{-1} \pm 2.84 \cdot 10^{-4} \frac{mol}{m^2}$, en Sucumbíos varían entre $1.08 \cdot 10^{-1} \pm 8.84 \cdot 10^{-4} \frac{mol}{m^2} - 1.20 \cdot 10^{-1} \pm 1.58 \cdot 10^{-3} \frac{mol}{m^2}$, en Pastaza varían entre $1.08 \cdot 10^{-1} \pm 2.26 \cdot 10^{-4} \frac{mol}{m^2} - 1.20 \cdot 10^{-1} \pm 2.51 \cdot 10^{-4} \frac{mol}{m^2}$, y finalmente en el Distrito Metropolitano de Quito varían entre $1.06 \cdot 10^{-1} \pm 5.00 \cdot 10^{-4} \frac{mol}{m^2} - 1.19 \cdot 10^{-1} \pm 6.96 \cdot 10^{-4} \frac{mol}{m^2}$ como se indica en la Tabla 10.

Figura 40

Análisis multitemporal de O₃ en Ecuador Continental.



Nota. (Autora, 2021).

Tabla 10

Concentraciones de O₃ para el periodo: diciembre de 2019-agosto de 2020.

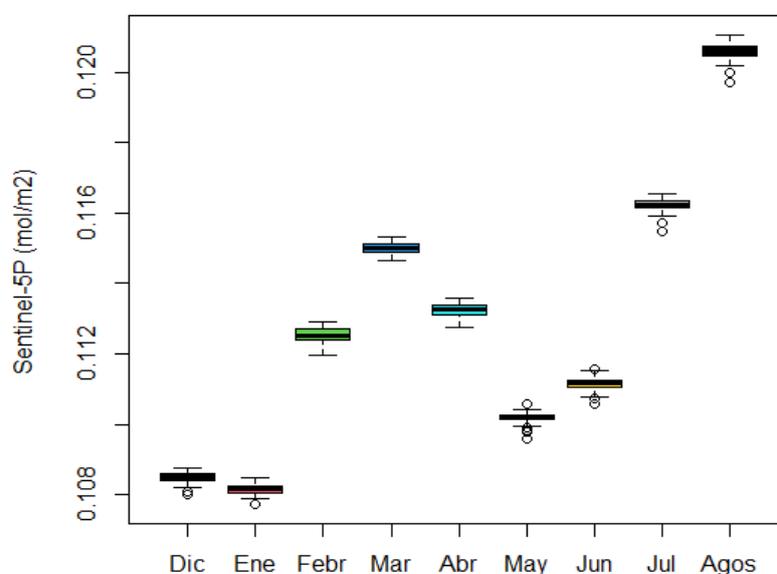
Mes	Ozono (mol/m ²)			
	DMQ (n=142)	Guayas (n=45)	Pastaza (n=389)	Sucumbios (n=194)
Diciembre	1.06 *10 ⁻¹ ± 5.04*10 ⁻⁴	1.08*10 ⁻¹ ± 1.60*10 ⁻⁴	1.08*10 ⁻¹ ± 2.26*10 ⁻⁴	1.08*10 ⁻¹ ± 9.44*10 ⁻⁴
Enero	1.06 *10 ⁻¹ ± 5.00*10 ⁻⁴	1.08*10 ⁻¹ ± 1.45*10 ⁻⁴	1.08*10 ⁻¹ ± 2.47*10 ⁻⁴	1.08*10 ⁻¹ ± 8.84*10 ⁻⁴
Febrero	1.10*10 ⁻¹ ± 5.59*10 ⁻⁴	1.13*10 ⁻¹ ± 2.17*10 ⁻⁴	1.12**10 ⁻¹ ± 1.86*10 ⁻⁴	1.12*10 ⁻¹ ± 1.15*10 ⁻³
Marzo	1.12*10 ⁻¹ ± 5.79*10 ⁻⁴	1.15*10 ⁻¹ ± 1.58*10 ⁻⁴	1.15*10 ⁻¹ ± 1.66*10 ⁻⁴	1.15*10 ⁻¹ ± 1.49*10 ⁻³
Abril	1.11*10 ⁻¹ ± 5.07*10 ⁻⁴	1.11*10 ⁻¹ ± 1.93*10 ⁻⁴	1.13*10 ⁻¹ ± 2.19*10 ⁻⁴	1.13*10 ⁻¹ ± 1.24*10 ⁻³
Mayo	1.09*10 ⁻¹ ± 5.03*10 ⁻⁴	1.11*10 ⁻¹ ± 1.82*10 ⁻⁴	1.09*10 ⁻¹ ± 2.52*10 ⁻⁴	1.10*10 ⁻¹ ± 1.33*10 ⁻³
Junio	1.10*10 ⁻¹ ± 5.90*10 ⁻⁴	1.11*10 ⁻¹ ± 1.92*10 ⁻⁴	1.11*10 ⁻¹ ± 2.86*10 ⁻⁴	1.12*10 ⁻¹ ± 9.53*10 ⁻⁴
Julio	1.15*10 ⁻¹ ± 6.68*10 ⁻⁴	1.12*10 ⁻¹ ± 2.06*10 ⁻⁴	1.17*10 ⁻¹ ± 3.06*10 ⁻⁴	1.17*10 ⁻¹ ± 9.37*10 ⁻⁴
Agosto	1.19*10 ⁻¹ ± 6.96*10 ⁻⁴	1.12*10 ⁻¹ ± 2.84*10 ⁻⁴	1.20*10 ⁻¹ ± 2.51*10 ⁻⁴	1.20*10 ⁻¹ ± 1.58*10 ⁻³

Nota. Las concentraciones de O₃ se expresan como media ± desviación estándar DQM (Distrito Metropolitano de Quito) (Autora, 2021).

De la misma manera se determinó que, en la provincia de Guayas, la característica más significativa fue que, en los meses de julio y agosto de 2020 existió un aumento significativo ($p_value < 0.005$) (Anexo E), en las concentraciones promedios mensuales de ozono (Figura 41, Tabla 10) en relación a los demás meses en estudio. Además se observa que, al comparar los tres periodos analizados; antes, durante y después de confinamiento por COVID-19, las concentraciones promedios mensuales de la etapa después del confinamiento con una concentración de $1.16*10^{-1} \pm 3.87*10^{-3} \frac{mol}{m^2}$ presentaron diferencias significativamente más altas ($p_value < 0.005$) (Anexo E), que los periodos antes del confinamiento con una concentración de $1.10*10^{-1} \pm 2.00*10^{-3} \frac{mol}{m^2}$ y durante el confinamiento con una concentración de $1.13*10^{-1} \pm 2.01*10^{-3} \frac{mol}{m^2}$ (Figura 42, Tabla 11).

Figura 41

Concentraciones de O_3 para Guayas en el periodo: diciembre 2019-agosto 2020.



Nota. (Autora, 2021).

Tabla 11

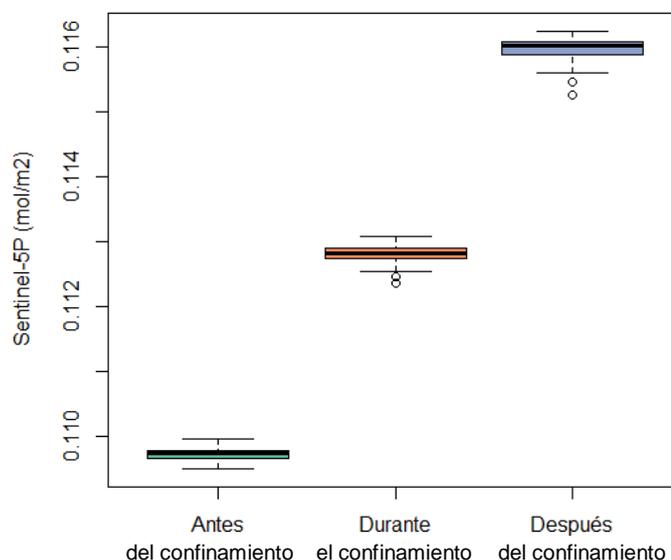
Concentraciones de O_3 para los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).

Zona de estudio	Ozono (mol/m^2)		
	Antes del confinamiento	Durante el confinamiento	Después del confinamiento
DMQ (n=426)	$1.07 \cdot 10^{-1} \pm 1.81 \cdot 10^{-3}$ ($1.05 \cdot 10^{-1} - 1.11 \cdot 10^{-1}$)	$1.11 \cdot 10^{-1} \pm 1.57 \cdot 10^{-3}$ ($1.08 \cdot 10^{-1} - 1.14 \cdot 10^{-1}$)	$1.15 \cdot 10^{-1} \pm 3.57 \cdot 10^{-3}$ ($1.09 \cdot 10^{-1} - 1.20 \cdot 10^{-1}$)
Guayas (n=135)	$1.10 \cdot 10^{-1} \pm 2.00 \cdot 10^{-3}$ ($1.08 \cdot 10^{-1} - 1.13 \cdot 10^{-1}$)	$1.13 \cdot 10^{-1} \pm 2.01 \cdot 10^{-3}$ ($1.10 \cdot 10^{-1} - 1.15 \cdot 10^{-1}$)	$1.16 \cdot 10^{-1} \pm 3.87 \cdot 10^{-3}$ ($1.11 \cdot 10^{-1} - 1.21 \cdot 10^{-1}$)
Pastaza (n=1167)	$1.10 \cdot 10^{-1} \pm 2.01 \cdot 10^{-3}$ ($1.07 \cdot 10^{-1} - 1.13 \cdot 10^{-1}$)	$1.12 \cdot 10^{-1} \pm 2.24 \cdot 10^{-3}$ ($1.07 \cdot 10^{-1} - 1.15 \cdot 10^{-1}$)	$1.16 \cdot 10^{-1} \pm 3.52 \cdot 10^{-3}$ ($1.09 \cdot 10^{-1} - 1.20 \cdot 10^{-1}$)
Sucumbíos (n=582)	$1.09 \cdot 10^{-1} \pm 2.15 \cdot 10^{-3}$ ($1.06 \cdot 10^{-1} - 1.20 \cdot 10^{-1}$)	$1.13 \cdot 10^{-1} \pm 2.35 \cdot 10^{-3}$ ($1.07 \cdot 10^{-1} - 1.22 \cdot 10^{-1}$)	$1.16 \cdot 10^{-1} \pm 3.72 \cdot 10^{-3}$ ($1.10 \cdot 10^{-1} - 1.29 \cdot 10^{-1}$)

Nota. DQM (Distrito Metropolitano de Quito) (Autora, 2021).

Figura 42

Concentraciones de O_3 para Guayas en los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).

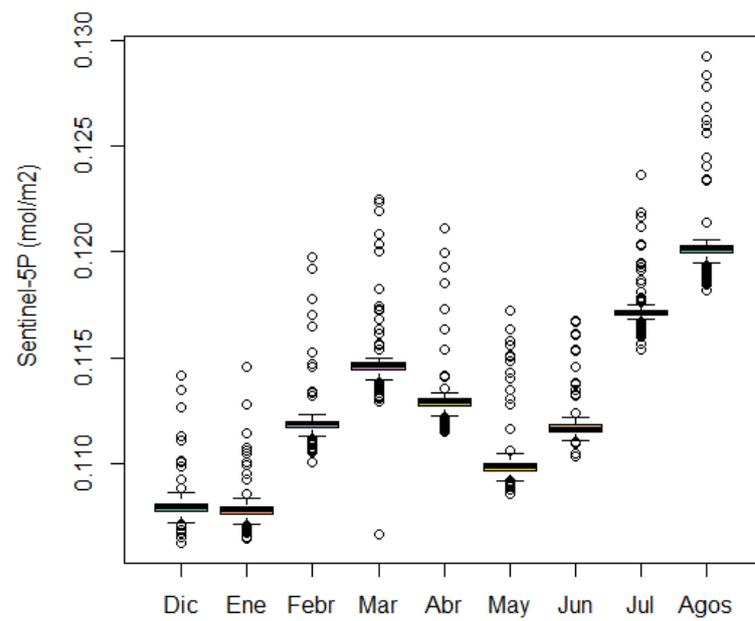


Nota. (Autora, 2021).

De la misma manera en la provincia de Sucumbíos se determinó que, los meses de julio y agosto de 2020 presentaron un aumento significativo en las concentraciones promedios mensuales de ozono (Figura 43, Tabla 10) en relación a los demás meses en estudio. Por otro lado, se observa que, al comparar las concentraciones de ozono de los periodos antes del confinamiento con una concentración de $1.09 \cdot 10^{-1} \pm 2.15 \cdot 10^{-3} \frac{mol}{m^2}$ y durante el confinamiento con una concentración de $1.13 \cdot 10^{-1} \pm 2.35 \cdot 10^{-3} \frac{mol}{m^2}$ las concentraciones fueron significativamente más bajas ($p_value < 0.005$) (Anexo E), que la etapa después del confinamiento con un valor de $1.16 \cdot 10^{-1} \pm 3.72 \cdot 10^{-3} \frac{mol}{m^2}$ (Figura 44, Tabla 11).

Figura 43

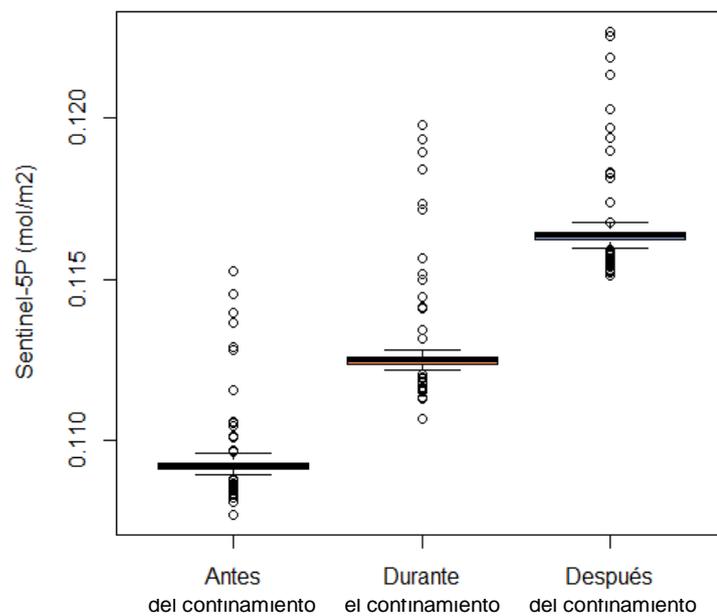
Concentraciones de O_3 para Sucumbíos en el periodo: diciembre 2019-agosto 2020.



Nota. (Autora, 2021).

Figura 44

Concentraciones de O_3 para Sucumbíos en los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).

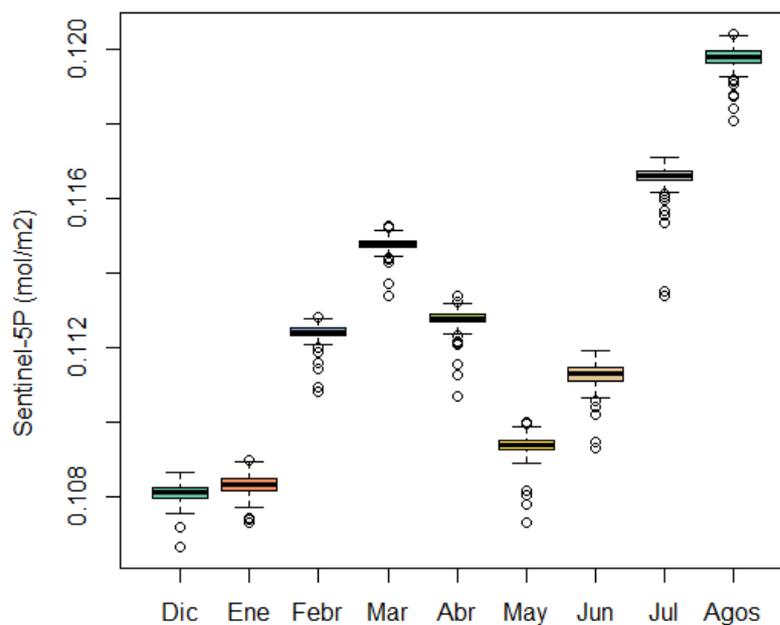


Nota. (Autora, 2021).

De la misma manera en la provincia de Pastaza se determinó que, los meses de julio y agosto de 2020 presentaron un aumento significativo en las concentraciones promedio mensuales de ozono (Figura 45, Tabla 10) en relación a los demás meses en estudio. Igualmente al comparar las concentraciones de ozono en función de los tres periodos; antes del confinamiento con una concentración de $1.10 \cdot 10^{-1} \pm 2.01 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$, durante el confinamiento con una concentración de $1.12 \cdot 10^{-1} \pm 2.24 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ y después del confinamiento con una concentración de $1.16 \cdot 10^{-1} \pm 3.52 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$, se observa que las concentraciones de ozono en la etapa después del confinamiento presentaron un aumento significativo ($p\text{-value} < 0.005$) (Anexo E) en relación a las etapa antes del confinamiento y durante el confinamiento (Figura 46, Tabla 11).

Figura 45

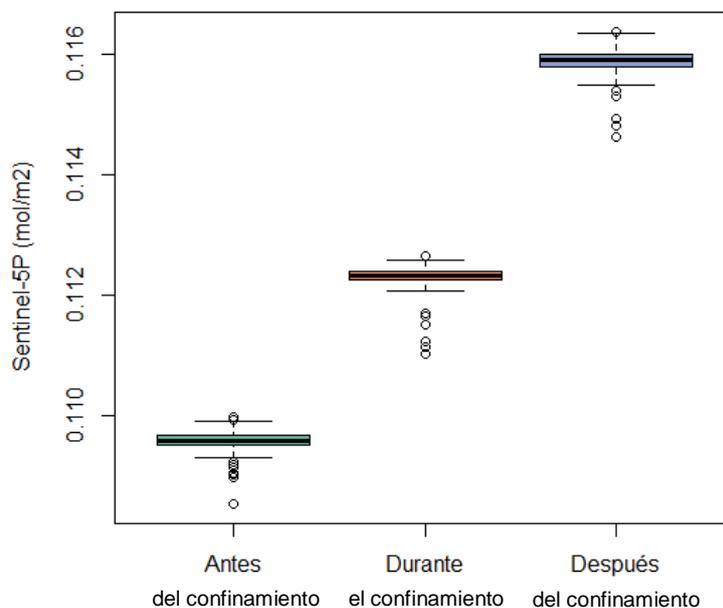
Concentraciones de O_3 para Pastaza en el periodo: diciembre 2019-agosto 2020.



Nota. (Autora, 2021).

Figura 46

Concentraciones de O_3 para Pastaza en los tres periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).

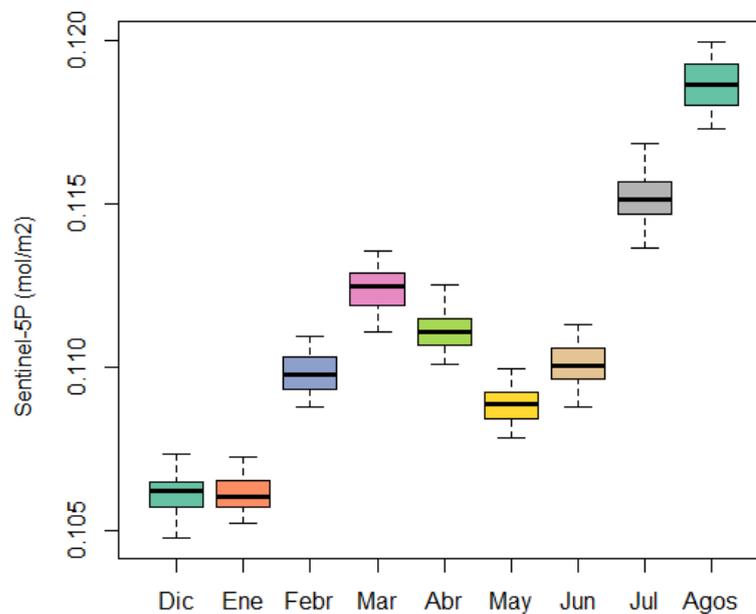


Nota. (Autora, 2021).

Finalmente, en el Distrito Metropolitano de Quito las concentraciones promedios mensuales de ozono, de los meses de julio y agosto de 2020 fueron significativamente más altos en relación a los demás meses en estudio (Figura 47, Tabla 10). De la misma manera se observa que, las concentraciones de ozono después del confinamiento con una concentración de $1.15 \cdot 10^{-1} \pm 3.57 \cdot 10^{-3} \frac{mol}{m^2}$ fueron significativamente más altos ($p_value < 0.005$) (Anexo E), que las concentraciones de ozono en relación a las etapas antes del confinamiento con un valor de $1.07 \cdot 10^{-1} \pm 1.81 \cdot 10^{-3} \frac{mol}{m^2}$ y durante el confinamiento con una concentración de $1.11 \cdot 10^{-1} \pm 1.57 \cdot 10^{-3} \frac{mol}{m^2}$ (Figura 48, Tabla 11).

Figura 47

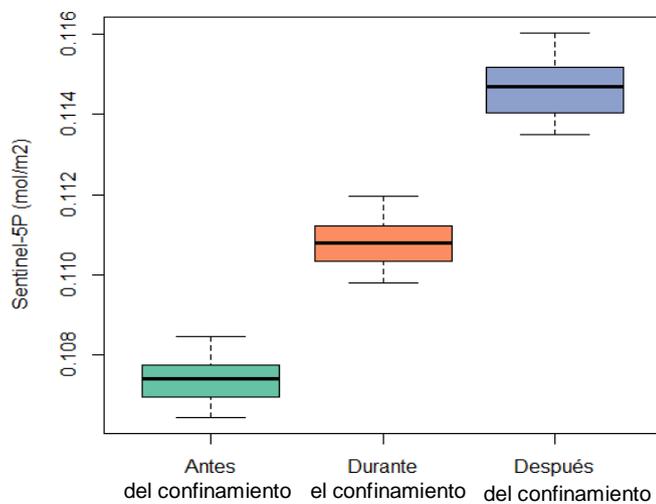
Concentraciones de O_3 para el Distrito Metropolitano de Quito en el periodo:
diciembre 2019-agosto 2020.



Nota. (Autora, 2021).

Figura 48

Concentraciones de O_3 para el Distrito Metropolitano de Quito en los tres periodos:
antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento
(marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).



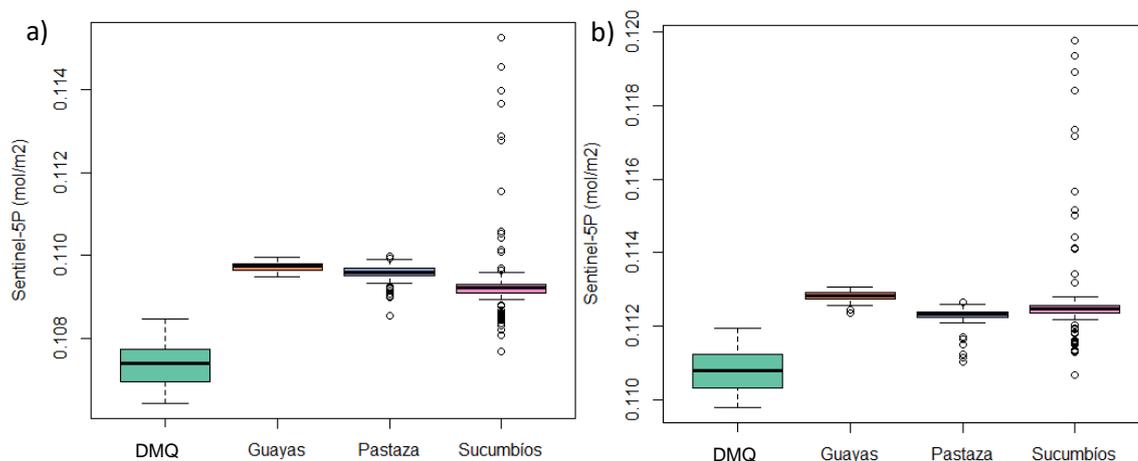
Nota. (Autora, 2021).

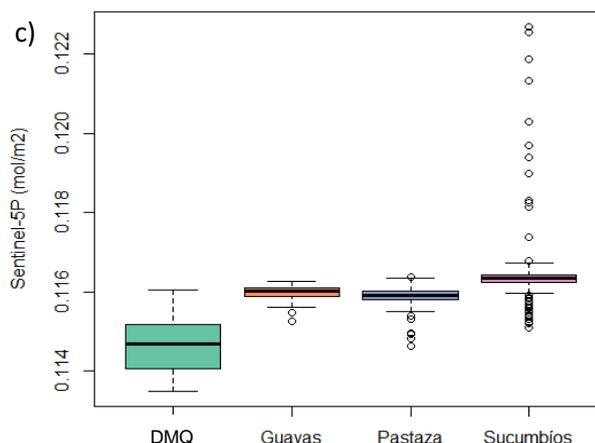
Finalmente, al comparar las concentraciones promedio mensuales de ozono entre las tres provincias en estudio y el Distrito Metropolitano de Quito en función de

los tres periodos; antes, durante y después del confinamiento (Figura 49), se observa que antes, durante y después del confinamiento por COVID-19, las concentraciones de ozono del Distrito Metropolitano de Quito fueron significativamente más bajas ($p_value < 0.005$) (Anexo F) que las provincias de Guayas, Sucumbíos y Pastaza. De la misma manera en la provincia de Guayas se muestra que, antes del confinamiento y durante el confinamiento por COVID-19 las concentraciones de ozono son significativamente más altos ($p_value < 0.005$) (Anexo F) que las provincias de Sucumbíos y Pastaza y el Distrito Metropolitano de Quito, sin embargo, al comparar las concentraciones de ozono después del confinamiento se observa que, la provincia de Sucumbíos presentó un aumento significativo ($p_value < 0.005$) (Anexo F) en relación a las provincias de Guayas, Pastaza y el Distrito Metropolitano de Quito.

Figura 49

Concentraciones de O_3 en los tres periodos: a) antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), b) durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y c) después del confinamiento (mayo-agosto 2020).





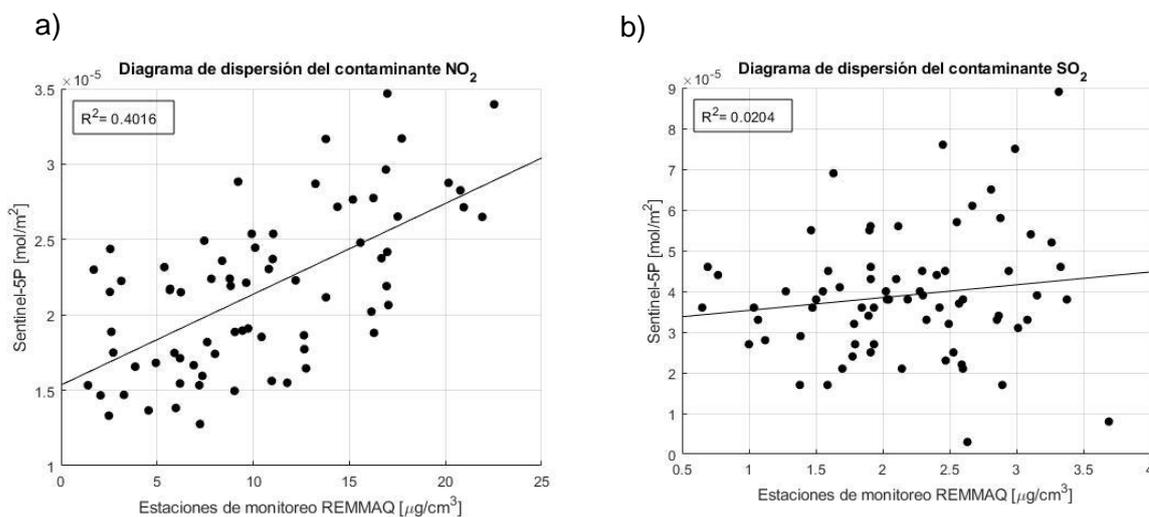
Nota. (Autora, 2021).

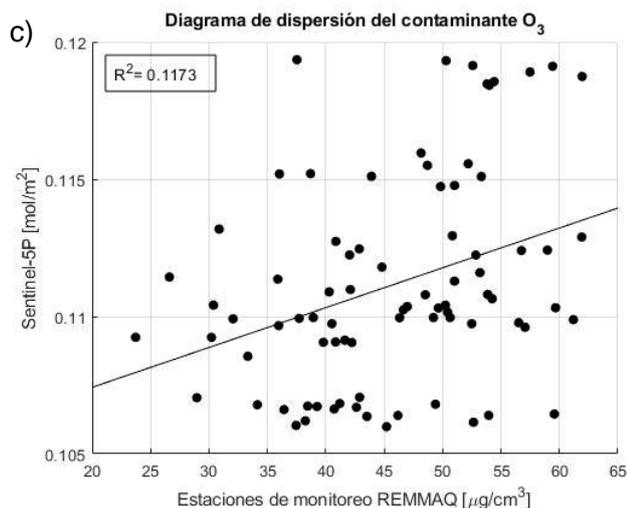
Validación de datos de contaminación

Para la validación de los datos de los diferentes contaminantes, NO₂, SO₂ y O₃ se comparó entre los valores de contaminación promedios mensuales en $\frac{\mu g}{m^3}$ de las estaciones del DMQ con respecto a las concentraciones promedios mensuales en $\frac{mol}{m^2}$ de Sentinel-5P. La validación de los datos se realizó mediante el modelo estadístico de regresión lineal simple obteniendo coeficientes de correlación de R²=0.40 para dióxido de nitrógeno, R²=0.1173 para ozono y R²=0.0204 para dióxido de azufre como se indica en la Figura 50.

Figura 50

Diagrama de dispersión de los diferentes contaminantes atmosféricos: NO₂, SO₂ y O₃ para el periodo: diciembre de 2019 – agosto de 2020.



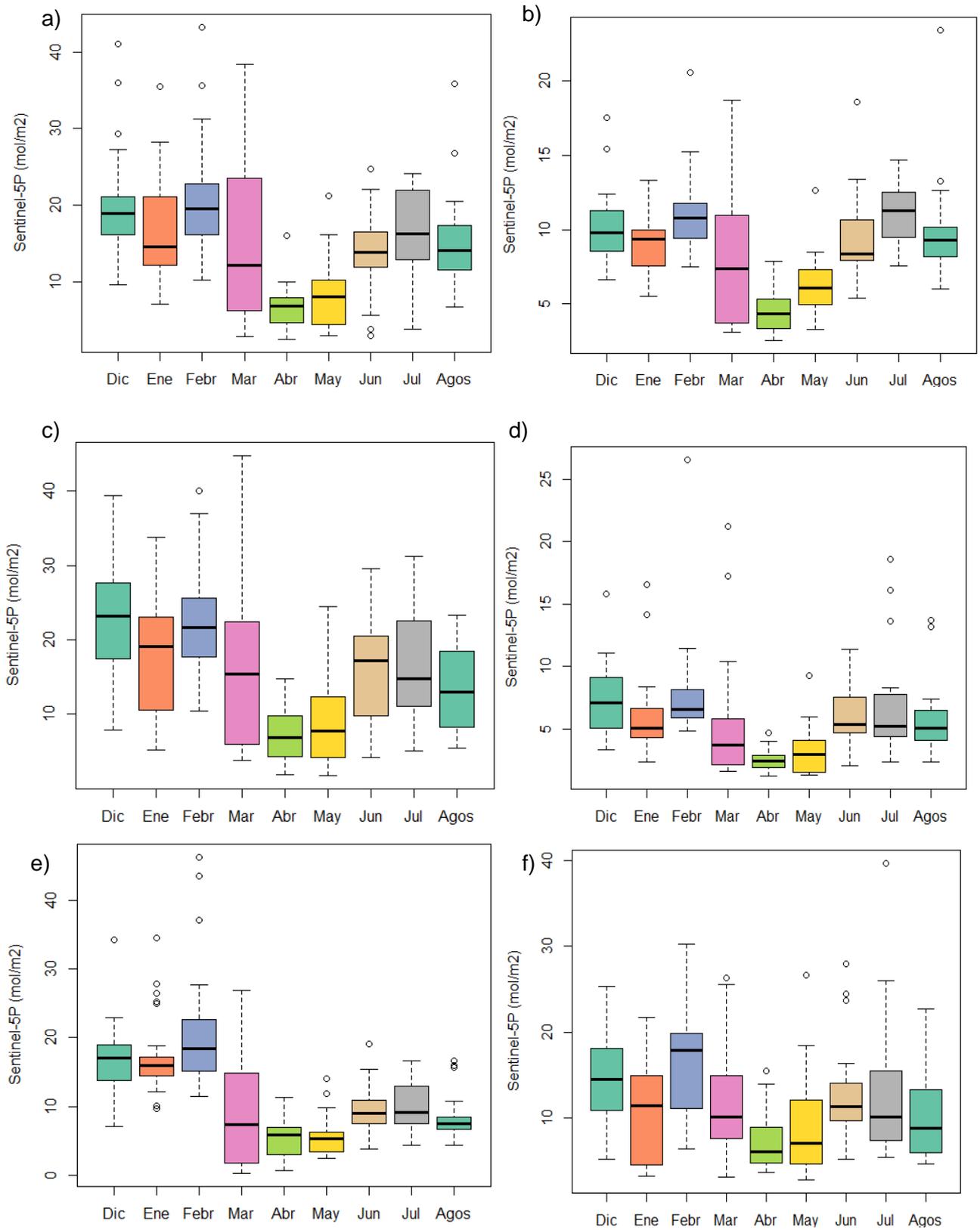


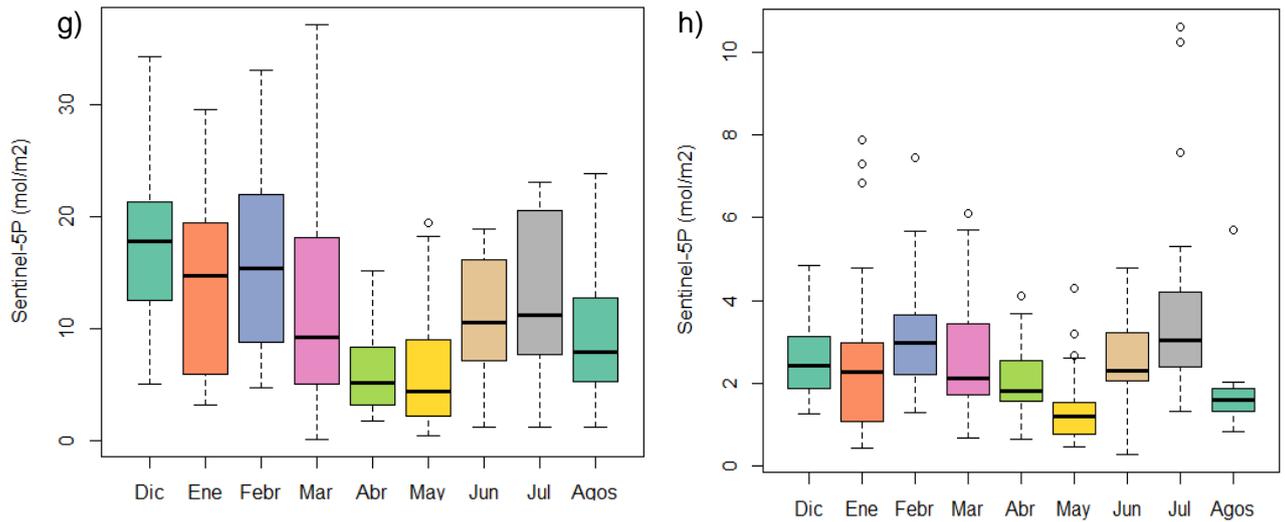
Nota. (Autora, 2021).

Además, para la validación de los datos de dióxido de nitrógeno se realizó diagramas estadísticos en función, de las concentraciones promedios mensuales en el periodo de diciembre de 2019 a agosto de 2020 y de los tres periodos analizados; antes, durante y después del confinamiento por COVID-19. Para el caso de dióxido de nitrógeno se validó con las 8 estaciones de monitoreo de la REMMAQ: Belisario, Carapungo, Centro histórico, Cotocollao, El Camal, Guamaní, Los Chillos y Tumbaco. En la validación se observa que las concentraciones promedios mensuales de dióxido de nitrógeno en el Distrito Metropolitano de Quito presentaron una disminución significativa en los meses de abril y mayo de 2020 (Figura 51), asimismo se observa que las concentraciones de dióxido de nitrógeno en las 8 estaciones de la REMMAQ, en el periodo durante el confinamiento presentaron una reducción significativa en relación a los periodos antes del confinamiento y después del confinamiento (Figura 52), a lo mencionado se determinó que, las concentraciones de las estaciones de monitoreo de la REMMAQ siguen la misma tendencia que los datos obtenidos a partir del satélite Sentinel-5P, en función de los nueve meses estudiados (Figura 21) y de los tres periodos; antes, durante y después del confinamiento por COVID-19 (Figura 22).

Figura 51

Concentraciones de NO_2 para las 8 estaciones de monitoreo de la REMMAQ en el periodo: diciembre de 2019 – agosto 2020.

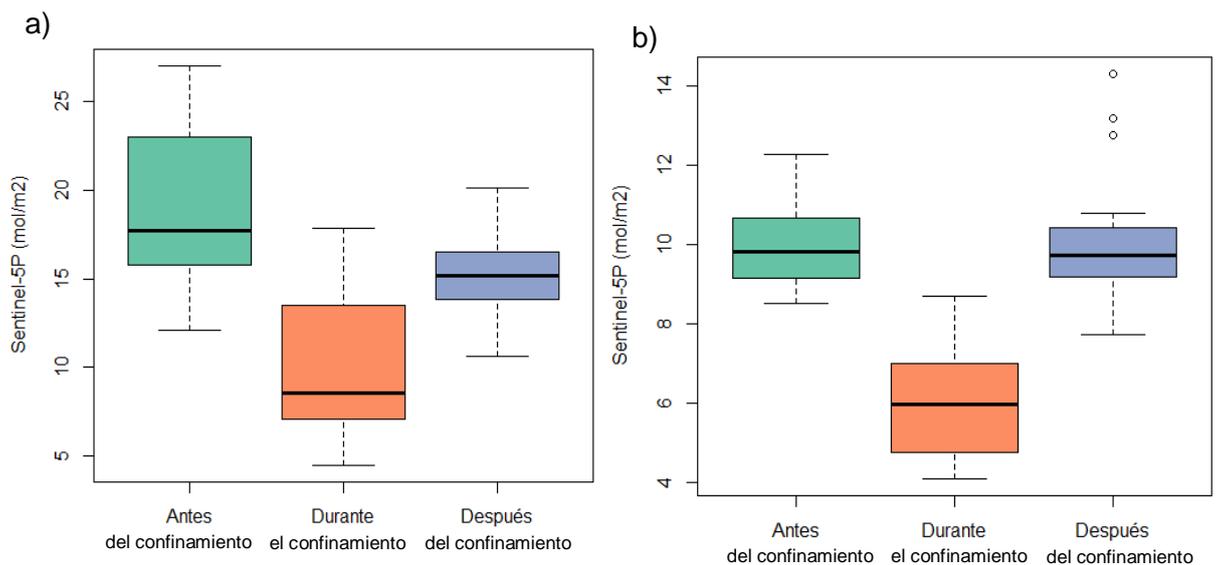


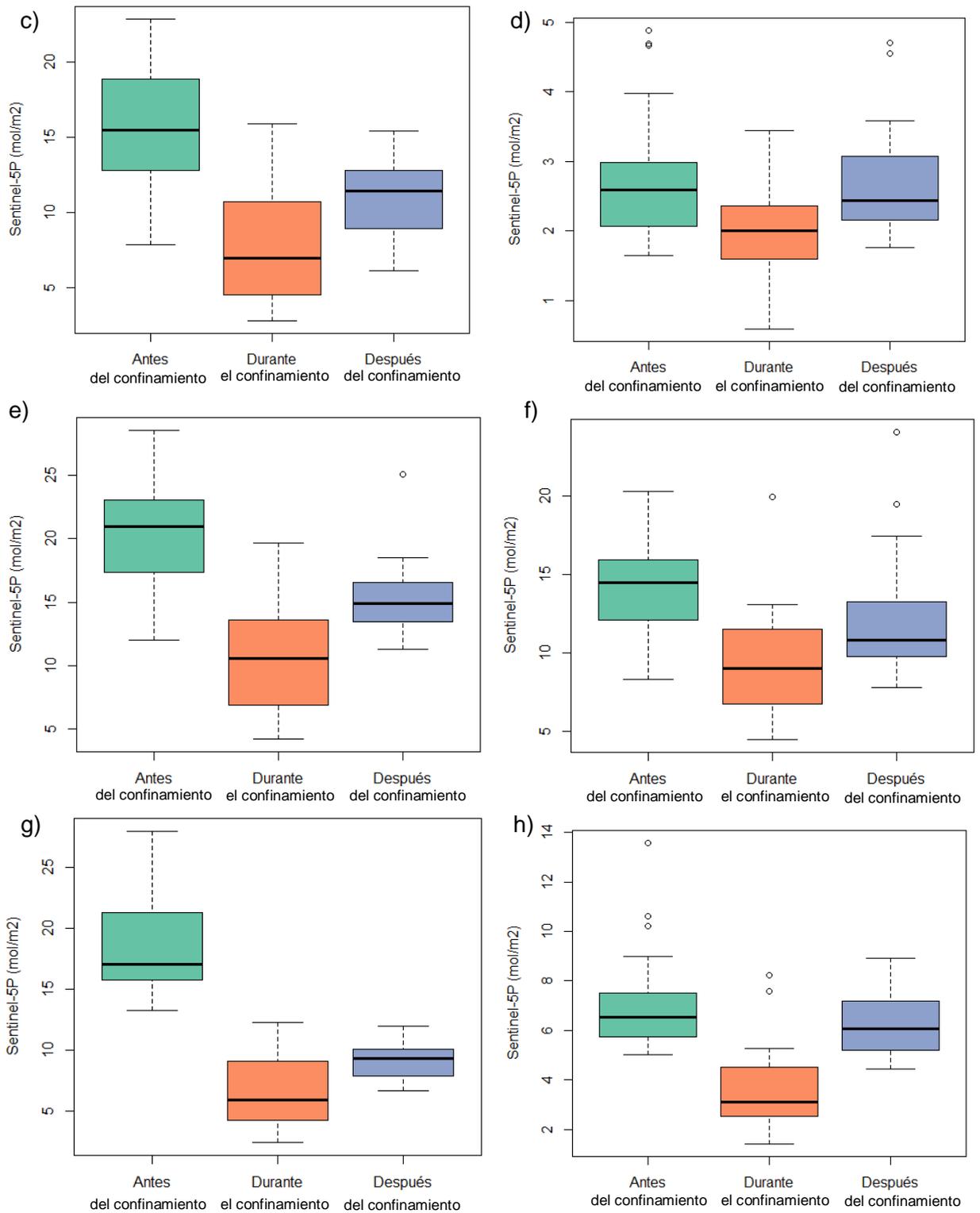


Nota. a) Belisario b) Carapungo c) Centro Histórico d) El Camal e) Cotocollao f) Guamaní g) Los Chillos h) Tumbaco (Autora, 2021).

Figura 52

Concentraciones de NO₂ para las 8 estaciones de monitoreo de la REMMAQ en los periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).



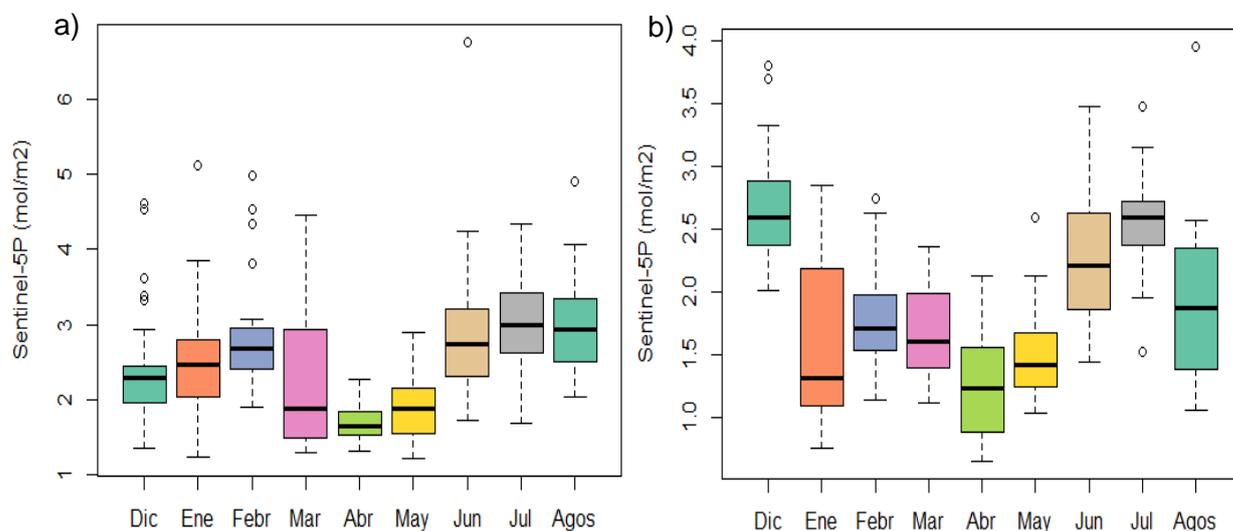


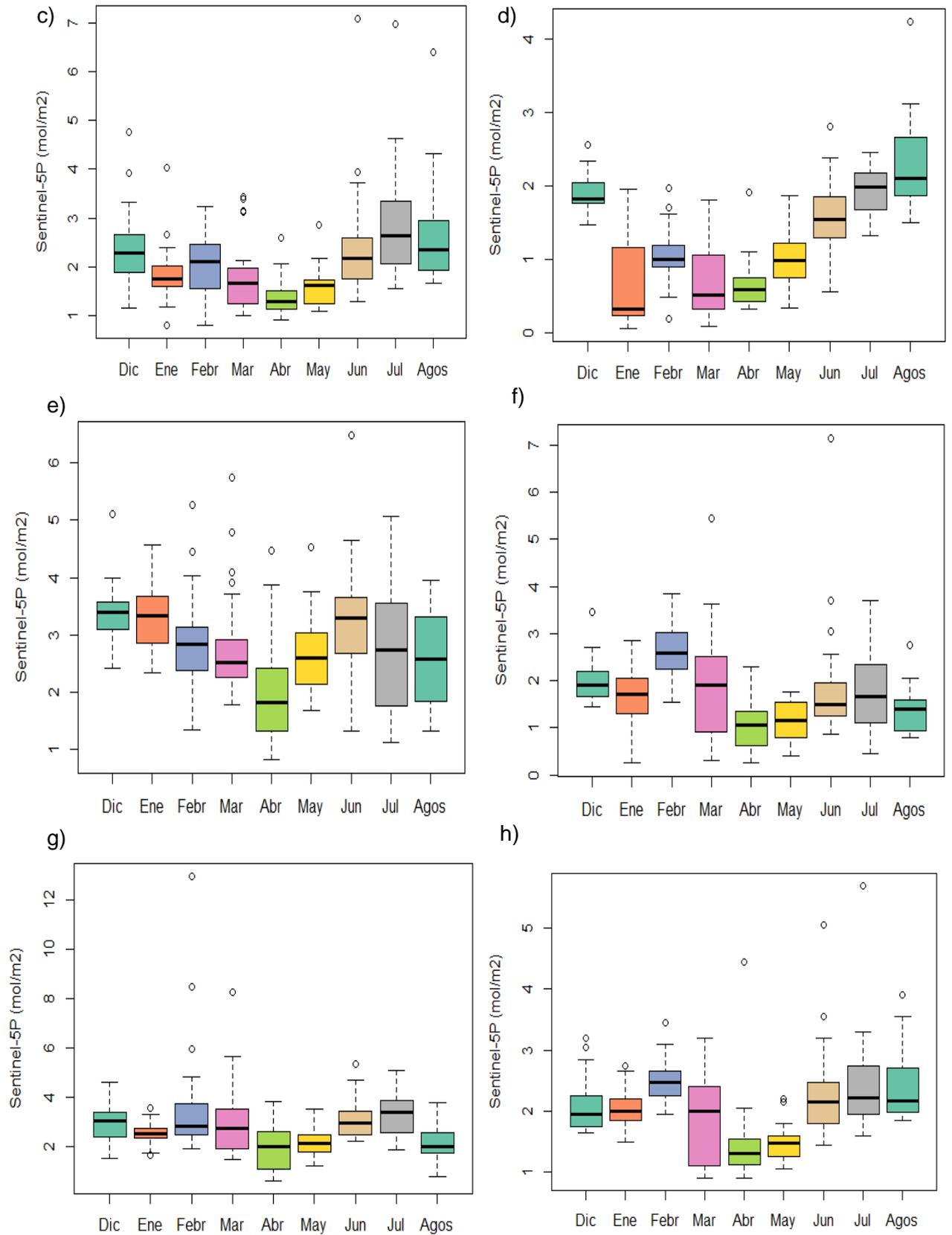
Nota. a) Belisario b) Carapungo c) Centro Histórico d) El Camal e) Cotocollao f) Guamaní g) Los Chillos h) Tumbaco (Autora, 2021).

De la misma manera, para la validación de los datos de dióxido de azufre se realizó diagramas estadísticos en función, de las concentraciones promedios mensuales en el periodo de diciembre de 2019 a agosto de 2020 y de los tres periodos analizados; antes, durante y después del confinamiento por COVID-19. Para el caso de dióxido de azufre se validó con las 8 estaciones de monitoreo de la REMMAQ: Belisario, Carapungo, Centro histórico, Cotocollao, El Camal, Guamaní, Los Chillos y Tumbaco. En la validación se observa que las concentraciones promedios mensuales de dióxido de azufre presentaron una disminución significativa en los meses de abril y mayo de 2020 (Figura 53), asimismo se observa que las concentraciones de dióxido de azufre en las 8 estaciones de la REMMAQ, presentaron una reducción significativa durante el confinamiento, en relación a los periodos antes del confinamiento y después del confinamiento (Figura 54), a lo mencionado se determinó que, las concentraciones de las estaciones de la REMMAQ siguen la misma tendencia que los datos obtenidos a partir del satélite Sentinel-5P, en función de los nueve meses estudiados (Figura 37) y de los tres periodos; antes, durante y después del confinamiento por COVID-19 (Figura 38).

Figura 53

Concentraciones de SO₂ para las 8 estaciones de monitoreo de la REMMAQ para el periodo: diciembre de 2019 – agosto 2020.



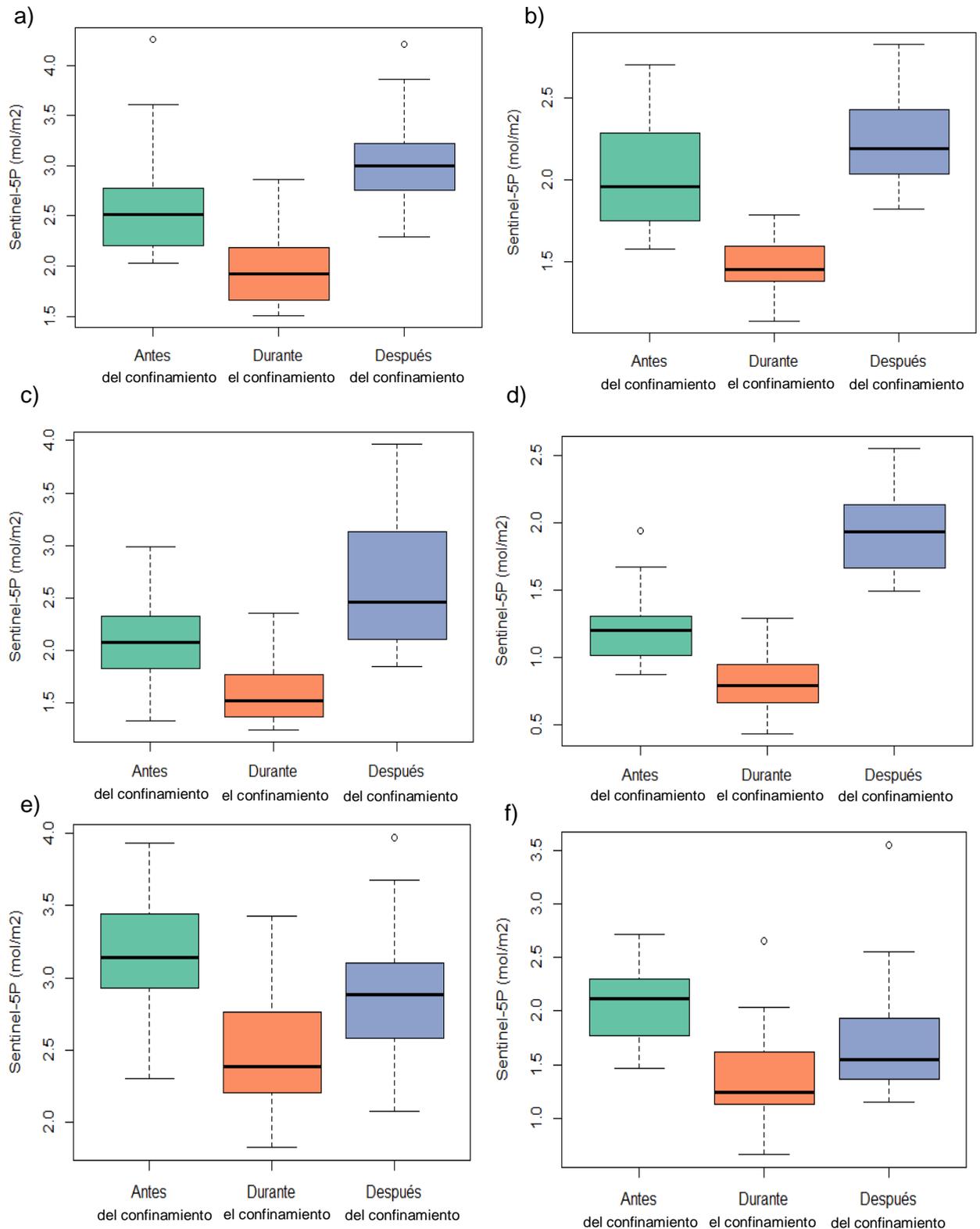


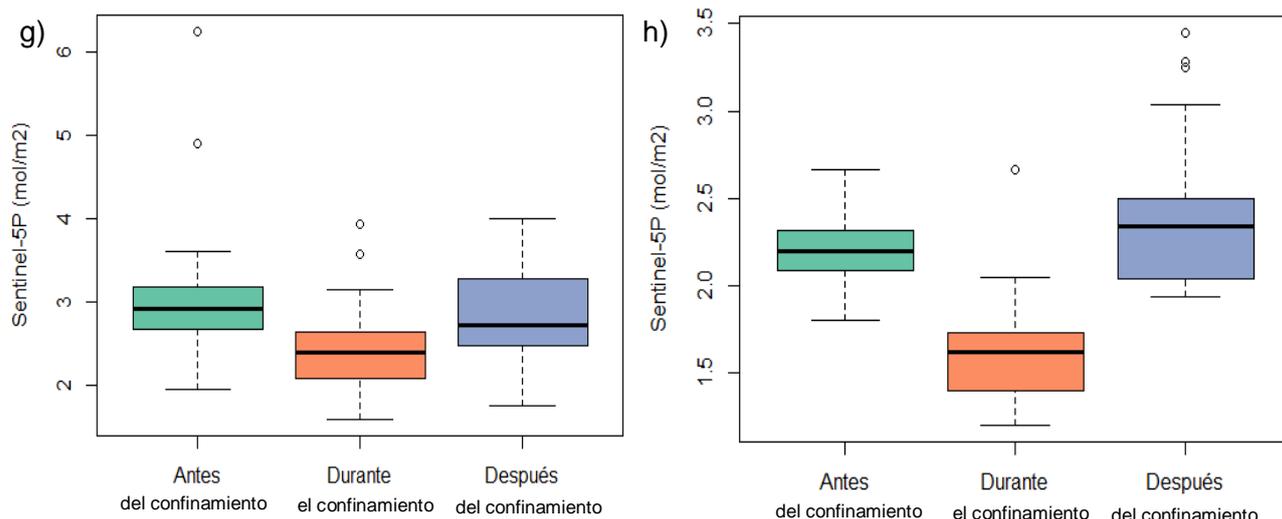
Nota. a) Belisario b) Carapungo c) Centro Histórico d) El Camal e) Cotocollao f)

Guamaní g) Los Chillos h) Tumbaco (Autora, 2021).

Figura 54

Concentraciones de SO_2 para las 8 estaciones de monitoreo de la REMMAQ en los periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).



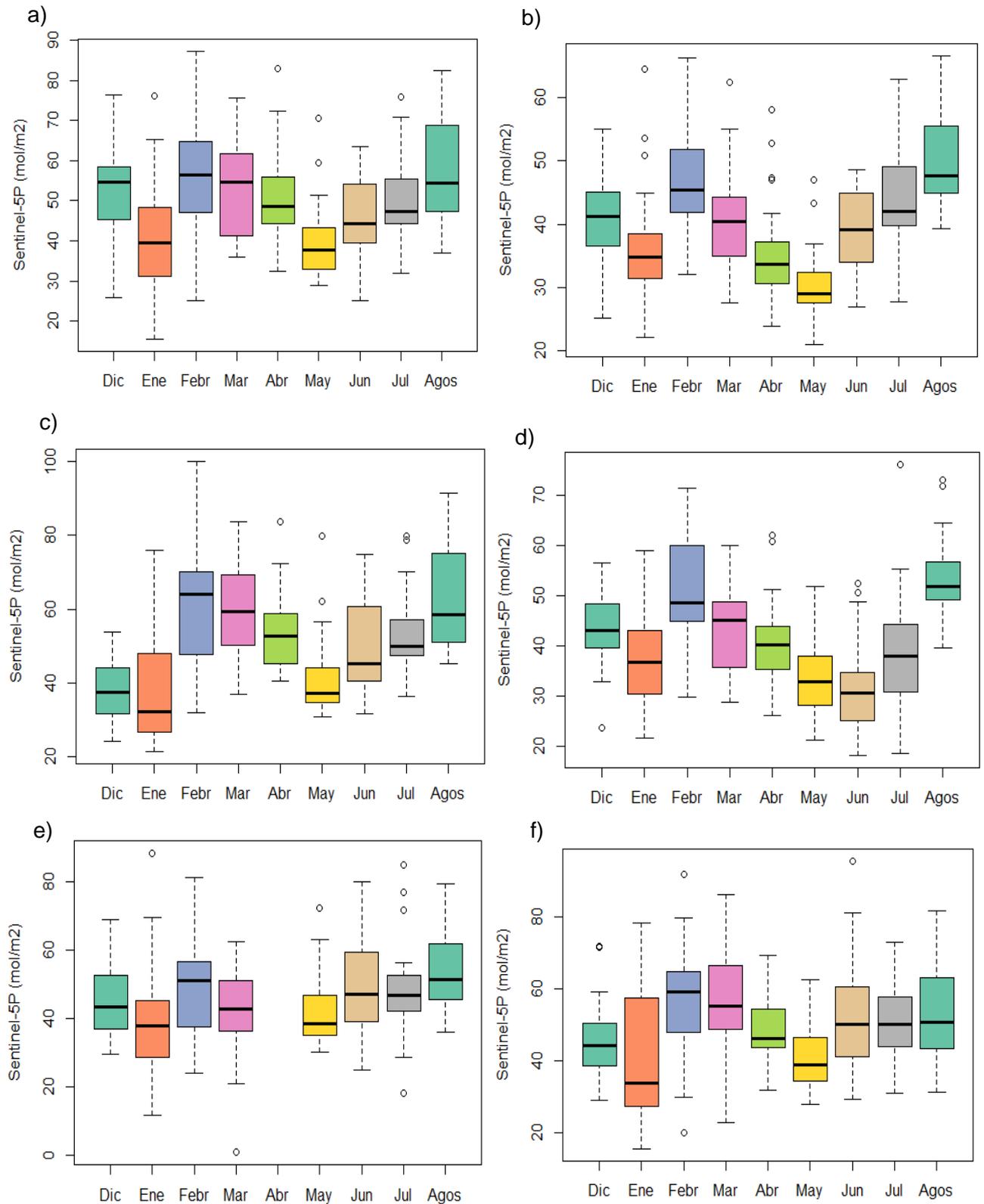


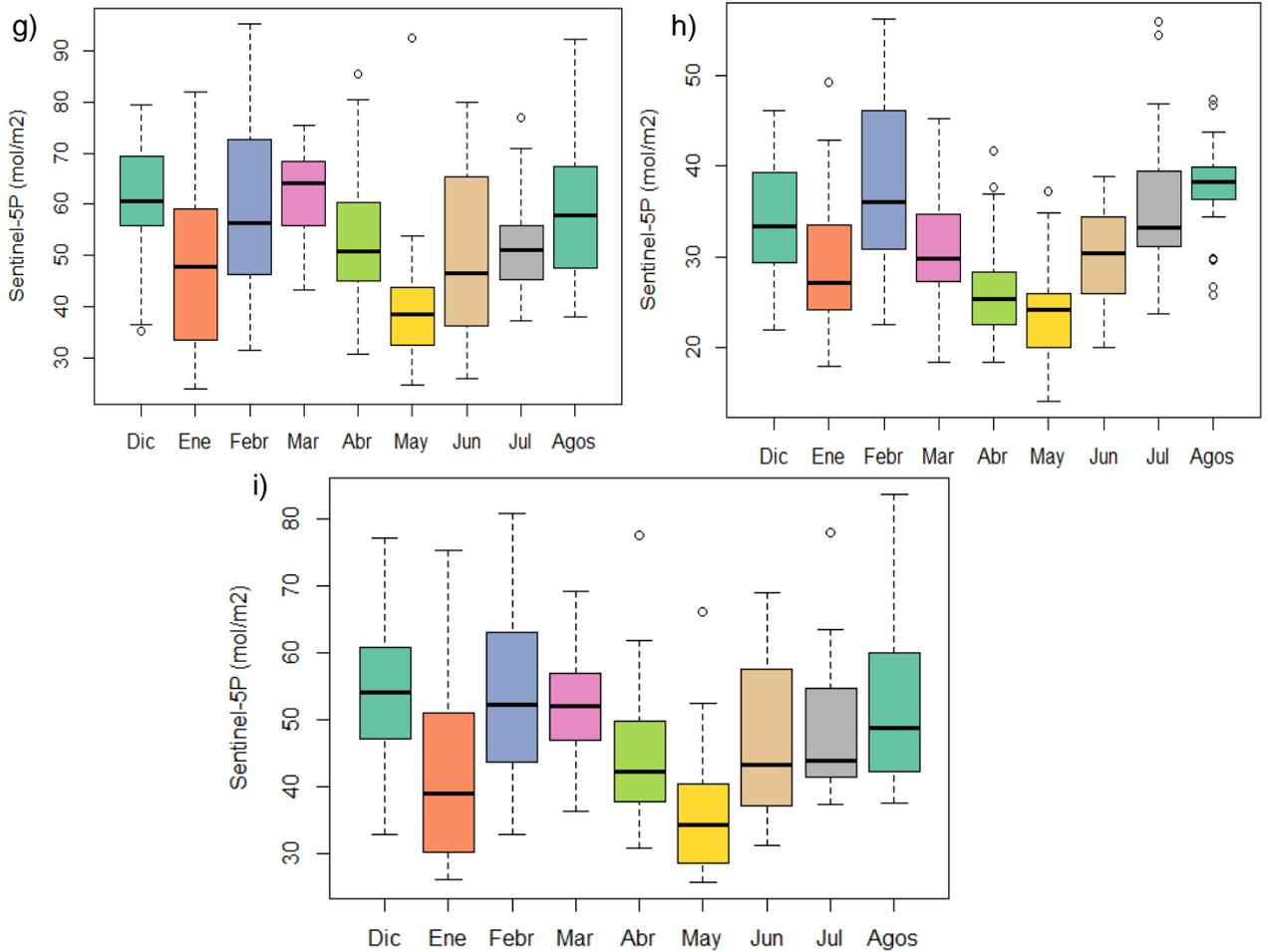
Nota. a) Belisario b) Carapungo c) Centro Histórico d) El Camal e) Cotocollao f) Guamaní g) Los Chillos h) Tumbaco (Autora, 2021).

Finalmente, para el caso de ozono se validó con las 9 estaciones de monitoreo de la REMMAQ: Belisario, Carapungo, Centro histórico, Cotocollao, El Camal, Guamaní, Los Chillos, San Antonio de Pichicha y Tumbaco donde se observa que las concentraciones promedios mensuales de ozono presentaron una disminución significativa en los meses de diciembre, enero, marzo y abril (Figura 55), asimismo se observa que las concentraciones de ozono en las 9 estaciones de la REMMAQ, en el periodo durante el confinamiento presentaron una reducción significativa en relación a los periodos antes del confinamiento y después del confinamiento (Figura 56), a lo mencionado se determinó que, las concentraciones de las estaciones de la REMMAQ no siguen la misma tendencia que los datos obtenidos a partir del satélite Sentinel-5P, en función de los nueve meses estudiados (Figura 47) y de los tres periodos; antes, durante y después del confinamiento por COVID-19 (Figura 48).

Figura 55

Concentraciones de O_3 para las 9 estaciones de monitoreo de la REMMAQ para el periodo: diciembre de 2019 – agosto 2020.

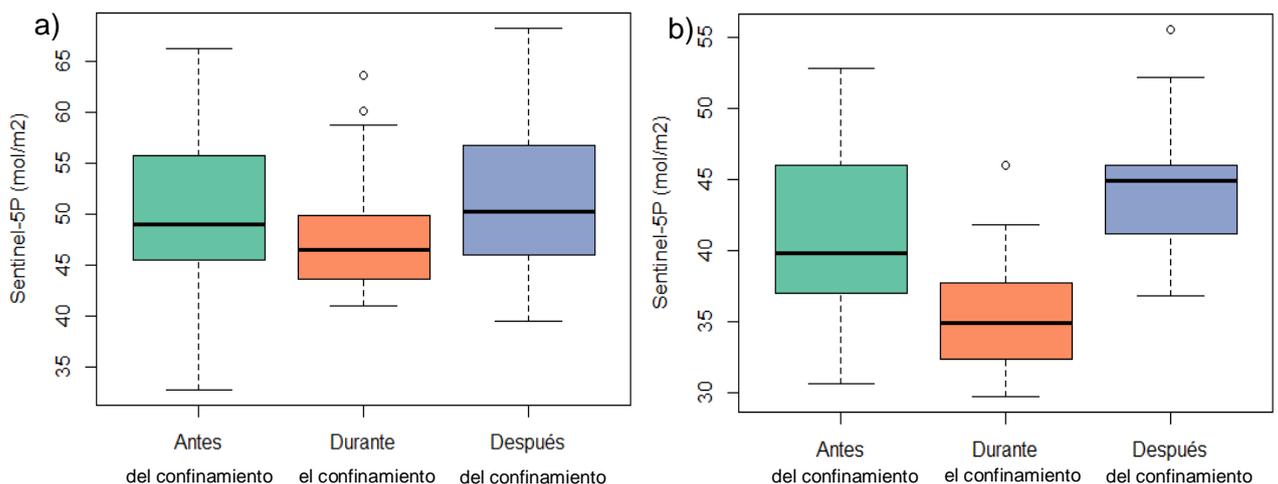


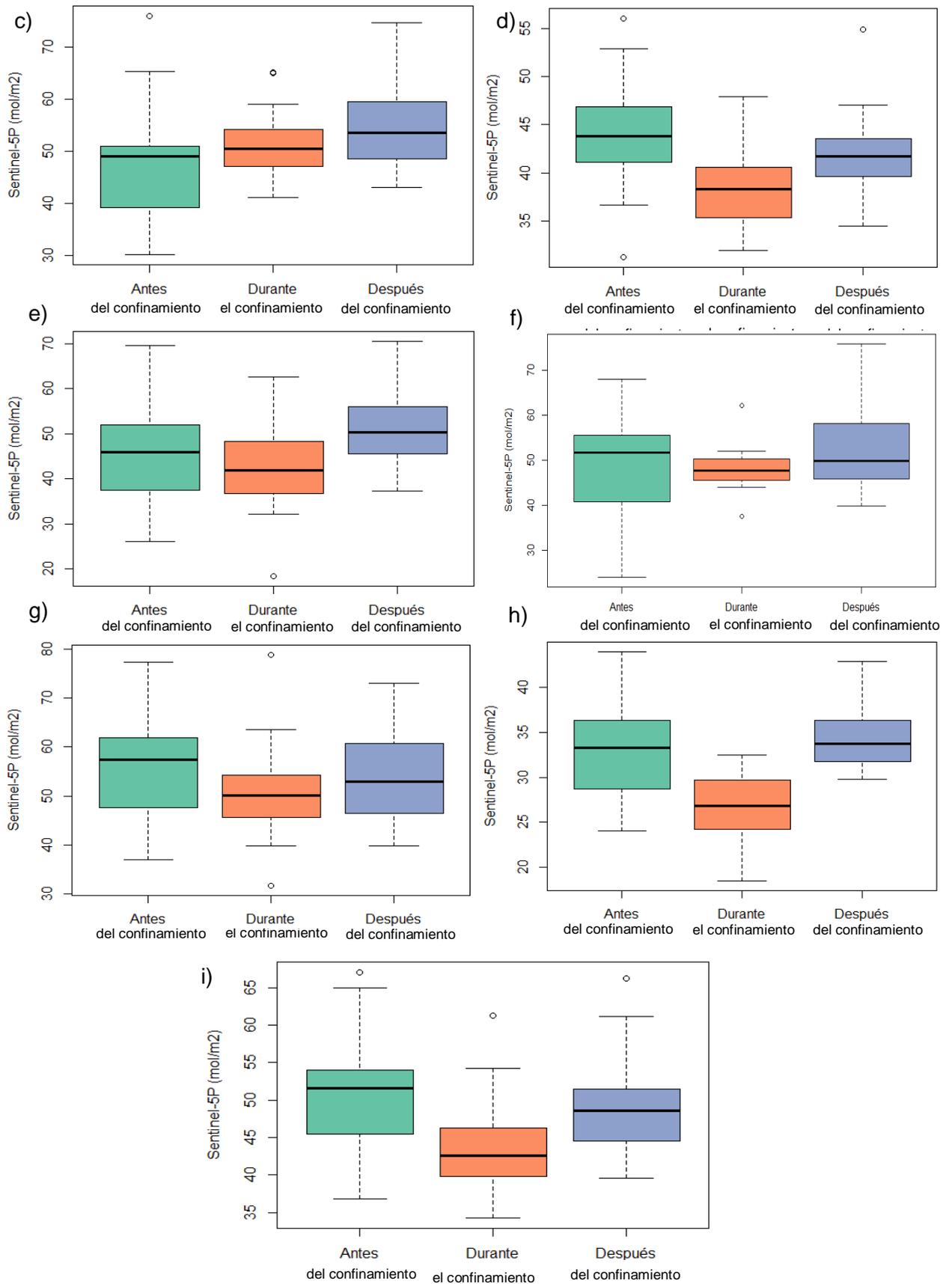


Nota. a) Belisario b) Carapungo c) Centro Histórico d) El Camal e) Cotocollao f) Guamaní g) Los Chillos h) San Antonio de Pichincha i) Tumbaco (Autora, 2021).

Figura 56

Concentraciones de O₃ para las 9 estaciones de monitoreo de la REMMAQ en los periodos: antes del confinamiento (diciembre 2019-febrero 2020), durante el confinamiento (marzo-abril 2020) y después del confinamiento (mayo-agosto 2020).





Nota. a) Belisario b) Carapungo c) Centro Histórico d) El Camal e) Cotocollao f)

Guamaní g) Los Chillos h) San Antonio de Pichincha g) Tumbaco (Autora, 2021).

Capítulo V

Discusión

Análisis de la variación de NO₂

Las concentraciones promedios mensuales de dióxido de nitrógeno en la provincia de Pichincha indicaron una reducción significativa en los meses de marzo con una concentración de $1.34 \cdot 10^{-5} \pm 3.65 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$, abril con una concentración de $1.10 \cdot 10^{-5} \pm 2.50 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ y mayo con una concentración de $1.34 \cdot 10^{-5} \pm 3.68 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ (Figura 21, Tabla 6) de la misma manera en Guayas existió una disminución significativa en los meses de marzo con una concentración de $2.24 \cdot 10^{-5} \pm 8.57 \cdot 10^{-6}$, abril con una concentración de $1.82 \cdot 10^{-5} \pm 4.46 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ y mayo con una concentración de $2.20 \cdot 10^{-5} \pm 7.41 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$, (Figura 23, Tabla 6) y finalmente la provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas presentó una disminución significativa en los meses de marzo con una concentración de $1.71 \cdot 10^{-5} \pm 1.74 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ y abril con una concentración de $1.63 \cdot 10^{-5} \pm 1.51 \cdot 10^{-6} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ (Figura 25, Tabla 6). Por otro lado, al comparar los tres periodos analizados (Tabla 7); antes, durante y después del confinamiento por COVID-19 se determinó que, para las provincias de Guayas (Figura 24), Santo Domingo de los Tsáchilas (Figura 26) y Pichincha (Figura 22) la etapa durante el confinamiento presentó una reducción significativa ($p_value < 0.005$), en las concentraciones de dióxido de nitrógeno en relación a los periodos antes del confinamiento y durante el confinamiento. Lo antes mencionado puede deberse a que, se establecieron una serie de medidas en el país a partir del 17 de marzo de 2020 debido a la emergencia sanitaria por COVID-19, como fueron, la reducción del tráfico vehicular, y el cese de las actividades industriales, considerando que las tres provincias en estudio albergan la mayor cantidad de industrias del país (Andino-Enríquez et al., 2018), sin embargo, en las tres provincias antes indicadas desde el mes de junio de 2020 y de la misma manera, en los meses

de julio y agosto de 2020 las concentraciones de NO₂ fueron significativamente más altos ($p_value < 0.005$) en relación a la provincia de Pichincha (Figura 21), Guayas (Figura 23) y Santo Domingo de los Tsáchilas (Figura 25), esto puede deberse a que a partir del 1 de junio de 2020 se modificaron algunas de las restricciones establecidas para la circulación vehicular, y se reanudaron varias actividades para ciertos sectores industriales con el fin de normalizar la situación económica a nivel nacional (Ministerio del Gobierno, 2020), además desde junio de 2020 se habilitó parcialmente el servicio de transporte interprovincial entre cantones que mantengan semáforo amarillo o verde (Ministerio de Transporte y Obras Públicas, 2020).

Análisis de la variación de SO₂

Las concentraciones promedios mensuales de dióxido de azufre en los nueve meses analizados presentaron una disminución significativa en las concentraciones de SO₂, para el caso de la provincia de Monona Santiago en los meses de marzo con una concentración de $1.99 \cdot 10^{-4} \pm 2.22 \cdot 10^{-4} \frac{mol}{m^2}$ y julio con una concentración de $1.02 \cdot 10^{-4} \pm 1.54 \cdot 10^{-4} \frac{mol}{m^2}$ (Figura 29), en Chimborazo en los meses de diciembre con una concentración de $2.30 \cdot 10^{-4} \pm 4.24 \cdot 10^{-5} \frac{mol}{m^2}$ y marzo con una concentración de $2.52 \cdot 10^{-4} \pm 7.51 \cdot 10^{-5} \frac{mol}{m^2}$ (Figura 31), en Guayas en los meses de diciembre con una concentración de $2.09 \cdot 10^{-4} \pm 5.21 \cdot 10^{-5} \frac{mol}{m^2}$, marzo con una concentración de $2.19 \cdot 10^{-4} \pm 4.55 \cdot 10^{-5} \frac{mol}{m^2}$ y mayo con una concentración de $2.01 \cdot 10^{-4} \pm 4.79 \cdot 10^{-5} \frac{mol}{m^2}$ (Figura 33), en Santa Elena en los meses de diciembre con una concentración de $1.94 \cdot 10^{-4} \pm 5.14 \cdot 10^{-5} \frac{mol}{m^2}$ y julio con una concentración de $4.37 \cdot 10^{-4} \pm 1.50 \cdot 10^{-4} \frac{mol}{m^2}$ (Figura 35), y finalmente en el Distrito Metropolitano de Quito en el mes de febrero con una concentración de $3.51 \cdot 10^{-5} \pm 1.66 \cdot 10^{-5} \frac{mol}{m^2}$ (Figura 37). Por otro lado, al comparar las concentraciones de dióxido de azufre en los tres periodos analizados; antes, durante y después del confinamiento se determinó que, el Distrito Metropolitano de Quito presentó diferencias significativas más bajas ($p_value <$

0.005) durante el confinamiento por COVID-19 (Figura 38, Tabla 9), sin embargo al comparar las concentraciones de dióxido de azufre en las provincias de Morona Santiago (Figura 30), Santa Elena (Figura 36), y Chimborazo (Figura 32), se observa que, por el contrario presentaron diferencias significativas más altas durante el confinamiento por COVID-19 y finalmente, la provincia de Guayas no presentó diferencias significativas en las concentraciones de dióxido de azufre en relación a los periodos antes del confinamiento y durante el confinamiento, sin embargo, presentó un aumento significativo en el periodo después del confinamiento. Lo antes mencionado puede deberse fundamentalmente al proceso eruptivo del volcán Sangay iniciado el 7 de mayo de 2019, y a partir de diciembre de 2019, la actividad del volcán Sangay se intensificó dando como resultado la emisión continua de gases, vapor de agua y caída de ceniza en zonas alejadas del volcán y hacia el sur-occidente afectando a las provincias de Chimborazo, Cañar, Bolívar, Guayas y Santa Elena (SNGRE, 2020; IGEPN, 2020).

Análisis de la variación de O₃

El análisis promedio mensual de variación de ozono indicó diferencias significativas más altas en los meses julio y agosto de 2020, para las tres provincias en estudio, Guayas con una concentración de $1.12 \cdot 10^{-1} \pm 2.06 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ en julio y $1.12 \cdot 10^{-1} \pm 2.84 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ en agosto (Figura 41, Tabla 10), en Pastaza con una concentración de $1.17 \cdot 10^{-1} \pm 3.06 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ en julio y $1.20 \cdot 10^{-1} \pm 2.51 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ en agosto (Figura 45, Tabla 10), de la misma manera Sucumbíos con una concentración de $1.17 \cdot 10^{-1} \pm 9.37 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ en julio y $1.20 \cdot 10^{-1} \pm 1.58 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ en agosto (Figura 43, Tabla 10), y finalmente el Distrito Metropolitano de Quito con una concentración de $1.15 \cdot 10^{-1} \pm 6.68 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ en julio y $1.19 \cdot 10^{-1} \pm 6.96 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mol}}{\text{m}^2}$ en agosto (Figura 47, Tabla 10). Por otro lado, al comparar las concentraciones de ozono en función de los tres periodos; antes durante y después del confinamiento

(Tabla 10) se observa que, para las tres provincias en estudio, Guayas (Figura 42), Sucumbíos (Figura 44), Pastaza (Figura 46) y el Distrito Metropolitano de Quito (Figura 48) no se registraron diferencias significativamente más bajas durante el periodo de confinamiento por COVID-19, indicándose un aumento significativo para las tres provincias antes mencionadas y el Distrito Metropolitano de Quito con tendencia a ascender en cada periodo analizado. Lo antes mencionado puede ser debido a que, el ozono es un contaminante secundario que no se emite directamente ya que se produce cuando los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles (COV_s) reaccionan mediante procesos fotoquímicos a la luz del sol (Riveros, 2017). El ozono generado en la tropósfera puede transportarse a grandes distancias dependiendo de las condiciones meteorológicas, de tal manera que puede generarse a partir de emisiones locales o de precursores emitidos en zonas lejanas (Bermejo et al., 2009), pudiendo ocasionar que, el efecto del confinamiento no contribuya a la disminución de ozono ya que existen diversas fuentes donde puede producirse este gas, lo cual no compensa una disminución significativa durante el confinamiento por COVID-19.

Análisis de la validación de datos

La validación de los datos indicó que las concentraciones de la columna de NO₂, SO₂ y O₃ del satélite Sentinel-5P tienen una correlación relativamente baja en relación a las concentraciones medidas en la superficie terrestre, sin embargo al representar gráficamente las concentraciones de los diferentes contaminantes atmosféricos en función de los nueve meses estudiados (diciembre 2019-agosto 2020) y de los tres periodos analizados; antes, durante y después del confinamiento, para el caso del dióxido de nitrógeno (Figura 51,52) y dióxido de azufre (Figura 53,54) se observa la misma tendencia al comparar los datos satelitales con los datos terrestres, sin embargo, el ozono (Figura 55,56) no presentó la misma tendencia al comparar los datos satelitales con los datos terrestres.

Capítulo VI

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Las concentraciones de dióxido de nitrógeno disminuyeron significativamente, durante la etapa de confinamiento en las provincias de Guayas, Pichincha y Santo Domingo de los Tsáchilas, debido a la serie de medidas implementadas por la emergencia sanitaria de COVID-19 lo cual se atribuye fundamentalmente a la restricción de la circulación vehicular y al cese de las actividades industriales.

En el análisis de la variación de dióxido de azufre, los niveles de concentración en el Distrito Metropolitano de Quito presentaron una disminución significativa durante la etapa de confinamiento, mientras que, por el contrario, las provincias de Morona Santiago, Chimborazo y Santa Elena mostraron un aumento significativo durante la etapa de confinamiento por COVID-19, y la provincia de Guayas no presentó diferencias significativas en relación a los periodos antes y durante el confinamiento. Lo mencionado anteriormente se atribuye principalmente al proceso eruptivo del volcán Sangay.

Las concentraciones de ozono en las provincias de Guayas, Sucumbíos, Pastaza y el Distrito Metropolitano de Quito, indicaron un aumento significativo durante el confinamiento por COVID-19 y con tendencia a ascender en el periodo después del confinamiento, atribuyéndose fundamentalmente a que, el ozono es un contaminante secundario que no se emite directamente y puede ser transportado a grandes distancias pudiendo ocasionar que el efecto del confinamiento no compense una disminución significativa.

El confinamiento debido a la pandemia de COVID-19 mostró un escenario inesperado, con un efecto ambiental global positivo principalmente para el dióxido de nitrógeno y con la oportunidad de evaluar el impacto de la actividad humana (especialmente del tráfico vehicular) sobre la calidad del aire ya que como se

esperaba, los niveles de contaminación volvieron progresivamente a los mismos niveles antes de la pandemia debido a la reactivación de las actividades económicas

El análisis comparativo de la variación de la calidad del aire en el Ecuador, con datos satelitales antes, durante y después del confinamiento por COVID-19 mostró las diferencias en la evolución espacio-temporal de dióxido de nitrógeno, azufre y ozono asociado con la serie de medidas implementadas en el país debido al COVID-19. Además, en el Ecuador, es importante implementar políticas, estándares y estrategias de mitigación ambiental, no solo durante una emergencia sanitaria, sino de manera permanente y que se encuentren efectivamente reguladas.

La validación de los datos de los diferentes contaminantes proporciona una evaluación temprana de su aplicabilidad para monitorear los niveles de contaminación en diferentes lugares del mundo. En general, las recuperaciones del satélite Sentinel-5P son valiosas para complementar los datos de calidad del aire en tierra, siendo utilizados en diferentes investigaciones para describir la variabilidad espacio-temporal de los diferentes contaminantes atmosféricos.

Recomendaciones

Se recomienda realizar más investigaciones en los que sean considerados otros gases implicados en la contaminación atmosférica como es el caso del monóxido de carbono, lo cual pueda ayudar a validar y completar datos de contaminación no solo en Ecuador, sino a nivel regional y global, siendo útil para los responsables de la toma de decisiones pudiendo establecer políticas para preservar la vida en la Tierra y tener un aire más limpio.

Para el análisis de la variabilidad de los diferentes contaminantes atmosféricos en futuras investigaciones se recomienda tener en cuenta la influencia de variables climáticas y meteorológicas como temperatura, humedad, propiedades fisicoquímicas y precipitación.

Referencias Bibliográficas

- Abad, L., & Mejía, D. (2017). *Estimación de la concentración de material particulado menor a 10 micras a través de sensores remotos en el área urbana de la ciudad de Cuenca*.
- Álvarez, C., & Padilla, O. (2014). *Estimación de contaminación del aire por PM10 en Quito determinado por índices ambientales obtenidos con imágenes satelitales Landsat ETM+ (tesis de doctorado)*. Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.
- Andino-Enríquez, M., Hidalgo-Bonilla, S., & Ladino, L. (2018). *Comparación de los Niveles de Concentración de Ozono Troposférico y Dióxido de Nitrógeno en Ecuador y Otras Latitudes*. 3(2). <https://doi.org/10.21931/RB/2018.03.02.5>
- Anselin, Luca. (2010). Local Indicators of Spatial Association – LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93–115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>.
- Araviiskaia, E., Berardesca, E., Bieber, T., Gontijo, G., Sánchez Viera, M., Marrot, L., Chuberre, B., & Dreno, B. (2019). The impact of airborne pollution on skin. *Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology*, 33(8), 1496–1505. <https://doi.org/10.1111/jdv.15583>.
- Baraldi, A., Humber, M., Tiede, D., Lang, S., & Moresi, L.-N. (2018). GEO-CEOS stage 4 validation of the Satellite Image Automatic Mapper lightweight computer program for ESA Earth observation level 2 product generation - Part 1: Theory. *Cogent Geoscience*, 4(1), 1467357. <https://doi.org/10.1080/23312041.2018.1467357>.
- Belmonte, P., & Gutiérrez, E. (2013). Es uno de los gases contaminantes con mayor incidencia en el Estado español. *Revista El Ecologista*, 79.
- Bermejo, V., del Amo, R., Cozar, S., Rábago, I., & García, M. (2009). *El ozono troposférico y sus efectos en la vegetación*.

- Bisquerra, R. (1987). La prueba de Levene para la homogeneidad de varianzas en el BMDP. *Revista Investigación Educativa*, 5(9), 79–85.
- Bolaños, P., & Chacón, C. (2017). Intoxicación por monóxido de carbono. *Medicina Legal de Costa Rica*, 34(1), 137–146.
- Borrego, C., Costa, A. M., Ginja, J., Amorim, M., Coutinho, M., Karatzas, K., Sioumis, T., Katsifarakis, N, Konstantinidis, K., De Vito, S., Esposito, E., Smith, P., André, N., Gérard, P., Francis, L. ., Castell, N., Schneider, P., Viana, M., & Penza, M. (2016). Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise. *Atmospheric Environment*, 147, 246–263.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.050>.
- Burns, J., Boogaard, H., Polus, S., Pfadenhauer, L.M Rohwer, A. C., A.M. van, E., Turley, R., & Rehfuss, E. A. (2020). Interventions to reduce ambient air pollution and their effects on health: An abridged Cochrane systematic review. *Environment International*, 135, 105400.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105400>.
- Campos, I. (2000). *Saneamiento Ambiental* (Universidad Estatal a Distancia). San José Costa Rica.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial* (Rialp (ed); Segunda) Madrid, España.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección Ambiental, la observación de la Tierra desde el Espacio* (Ciencias,). Barcelona, España.
- Cobo, R., & Arcos, F. (2016). Análisis y revisión de la red de monitoreo de calidad del aire de la ciudad de Cuenca, Ecuador. *La Granja: Revista de Ciencias de La Vida*, 23(1), 25–34. <https://doi.org/10.17163/lgr.n23.2016.03>.
- Constitucion De La Republica Del Ecuador, Registro oficial 449 de 20 Oct. 2008 1 (2008). <http://www.ambiente.gob.ec/wp->
- Código Orgánico del Ambiente. (2017). Registro Oficial Suplemento 983 de 12-abr.-2017. <https://www.ambiente.gob.ec/wp->

- Correa, J. C., Iral, R., & Rojas, L. (2006). A Study of the Power of Tests for Homogeneity of Variance. *Revista Colombiana de Estadística*, 29(1), 57–76.
- Davis, M., & Masten, S. (2005). *Ingeniería y ciencias ambientales* (M.-H. Interamericana (ed.)). México D.F.
- ESA. European Space Agency. (2021a). *Earth's climate and atmosphere*. Agencia Nacional Europea.
https://www.esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/Earth_s_climate_and_atmosphere.
- ESA. European Space Agency. (2021b). *Observing our future-Science Website*. Copernicus-TROPOMI. <http://www.tropomi.eu/data-products/nitrogen-dioxide>.
- Forero, D. D. (2019). *Metodología para la incorporación de datos del sensor tropomi del satélite sentinel 5-p al monitoreo de la calidad del aire en Bogotá DC*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- García-Villalpando, J. A., Castillo-Morales, A., Ramírez-Guzmán, M. E., Rendón-Sánchez, G., & Larqué-Saavedra, M. U. (2001). Comparación de los procedimientos de Tukey, Duncan, Dunnett, HSU y Bechhofer para la selección de medias. *Agrociencia*, 35(1), 79–86.
- García, M., Ramírez, H., Ulloa, H., García, O., Meulenert, Á., & Alcalá, J. (2013). Concentración de contaminantes SO₂, NO₂ y correlación con H⁺, SO₄⁻² y NO₃⁻ durante la temporada de lluvias en la Zona Metropolitana de Guadalajara, Jalisco, México. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, 29(2), 81–88.
<https://doi.org/10.4067/S0717-73482013000200004>.
- Getis, A., & Ord, K. j. (2010). The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. *Geographical Analysis*, 24(3), 189–206. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01976-0_10.
- Gómez, R. S. (2008). *Análisis estadístico de datos espacio-temporales mediante modelos funcionales de series temporales*. Universidad de Granada.
- Green, J., & Sánchez, S. (2013). *La Calidad del Aire en América Latina: Una visión*

Panorámica (Clean Air).

Grosso, N., Ferreira, F., & Mesquita, S. (2007). Improvement in particles (PM10) urban air quality mapping interpolation using remote sensing data.

Developments in Environmental Science, 6, 265–274.

[https://doi.org/doi.org/10.1016/S1474-8177\(07\)06031-7](https://doi.org/doi.org/10.1016/S1474-8177(07)06031-7).

Guerreiro, C. B., Foltescu, V., & De Leeuw, F. (2014). Air quality status and trends in Europe. *Atmospheric Environment*, 98, 376–384.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.09.017>.

Guirola, J., Pérez, L., García, Y., O'Reilly, D., & Guedes, R. (2019). Intoxicación por monóxido de carbono. *Revista Cubana de Medicina Militar*, 48(2), 245–251.

Gustavo, C. (2015). *Análisis y Diseños de Experimentos :Comparación de medias de tratamientos*.

IGEPN. Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. (2020). *Informe especial del volcán Sangay*. <https://www.igepn.edu.ec/servicios/noticias/1817-informe-especial-del-volcan-sangay-n-2-2020>.

INEC. Instituto Nacional de Estadística y Censos (2010). *Población, superficie (km2), densidad poblacional a nivel parroquial*. Instituto Nacional de Estadística y Censos.

[www.ecuadorencifras.gob.ec/search/Población,+superficie+\(km2\),+densidad+poblacional+a+nivel+parroquial/](http://www.ecuadorencifras.gob.ec/search/Población,+superficie+(km2),+densidad+poblacional+a+nivel+parroquial/).

INEC. Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2020). *Proyecciones Poblaciones. Proyección por edades Provincias 2010-2020 y nacional*. Instituto Nacional de Estadística y Censos. www.ecuadorencifras.gob.ec/proyecciones-poblacionales/.

Jerves, R., Machado, J., & Acosta, E. (2016). *Análisis Temporal del Contenido de PM10 en el aire de Cuenca a partir de Imágenes Landsat*.

Juodis, L., Filistovič, V., Maceika, E., & Remeikis, V. (2016). Analytical dispersion model for the chain of primary and secondary air pollutants released from point

source. *Atmospheric Environment*, 128, 216–226.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.12.019>.

Khafaie, A. M., Yajnik, C., Salvi, S., & Ojha, A. (2016). Critical review of air pollution health effects with special concern on respiratory health. *Journal of Air Pollution and Health*, 1(2), 123–136.

<https://doi.org/japh.tums.ac.ir/index.php/japh/article/view/42>.

Lambert, J., & Keppens, A. (2020). *Quarterly Validation Report of the Copernicus Sentinel-5 Precursor Operational Data Products #06: April 2018 – February 2020*.

Liu, Z., Guan, Q., Luo, H., Wang, N., Pan, N., Yang, L., Xiao, S., & Lin, J. (2019).

Development of land use regression model and health risk assessment for NO₂ in different functional areas: A case study of Xi'an, China. *Atmospheric Environment*, 213(15), 515–525. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.06.044>

Environment, 213(15), 515–525. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.06.044>

Lyons, R., Doherty, R., Reay, D., & Shackley, S. (2020). Legal but lethal: Lessons from NO₂ related mortality in a city compliant with EU limit value. *Atmospheric Pollution Research*, 11(6), 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.02.016>.

Pollution Research, 11(6), 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.02.016>.

Marques Dos Santos, M. (2001). *Estadística Básica un enfoque no paramétrico*. (UNAM).

Martínez, J., & Lluveras, E. (2019). Contaminación atmosférica. *ResearchGate*.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14603.34087>.

Mc Kight, P. E., & Najab, J. (2009). *The Corsini Encyclopedia of Psychology* (I. John Wiley & Sons (ed.); Irving B.). [https://doi.org/McKight, P. E., & Najab, J. \(2010\).](https://doi.org/McKight, P. E., & Najab, J. (2010).)

Kruskal-Wallis Test. *The Corsini Encyclopedia of Psychology*.

[doi:10.1002/9780470479216.corpsy0491](https://doi.org/10.1002/9780470479216.corpsy0491).

Ministerio de Transporte y obras Públicas. (2020). *Protocolo para reactivar el servicio público de transporte terrestre en el ámbito interprovincial dentro del periodo de semaforización*. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp->

Ministerio del Gobierno. (2020). *Desde el 1 de junio se cambian algunas reglas de la semaforización por la emergencia sanitaria.*

<https://www.ministeriodegobierno.gob.ec/desde-el-1-de-junio-se-cambian-algunas-reglas-de-la-semaforizacion-por-la-emergencia-sanitaria/>

MREMH. Ministerio de Relaciones Exteriores y Movilidad Humana. (2020).

Bienvenidos al Ecuador. Ministerio de Relaciones Exteriores y Movilidad Humana. www.cancilleria.gob.ec/bienvenidos-al-ecuador/#

NASA. (2001). The Earth Science Enterprise Series - Ozono. *National Aeronautics and Space Administration.* <http://earth.nasa.gov>.

Navarrete, E., & Laubacher, G. (2017). *APUNTES DE TELEDETECCIÓN:*

Teledetección Espacial y Procesamiento de Imágenes.

<https://www.researchgate.net/publication/320910845>.

Núñez, C. (2018). Análisis de varianza no paramétrica: un punto de vista a favor para utilizarla. *Acta Agrícola y Pecuaria*, 4(3), 69–79.

<https://doi.org/10.30973/aap/2018.4.3/1>.

Ogen, Y. (2020). Assessing nitrogen dioxide (NO₂) levels as a contributing factor to the coronavirus (COVID-19) fatality rate. *Science of the Total Environment*, 726, 138605. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138605>.

OMS, Organización Mundial de la Salud. (2017). *Contaminación del aire.*

Organización Mundial de La Salud. https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1, 2017.

OMS, Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre: actualización mundial 2005.* (No. WHO/SDE/PHE/OEH/06.02).

OMS, Organización Mundial de la Salud. (2020). *Ambient air pollution. Global Health Observatory (GHO) data.* https://www.who.int/gho/phe/outdoor_air_pollution/en/.

OPS, Organización Panamericana de la Salud (2018). *Contaminación del aire*

ambiental. Enfermedades transmisibles y determinantes de salud

Medioambiental. www.paho.org/.

- Oyague, E., Yaja, A., & Franco, P. (2020). Efectos ambientales del confinamiento debido a la pandemia de COVID-19. *Ciencia & Desarrollo*, 26, 2–19. <https://doi.org/10.33326/26176033.2020.26.901>.
- Oyarzún, M. (2010). Contaminación aérea y sus efectos en la salud. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, 26(1), 16–25. <https://doi.org/10.4067/S0717-73482010000100004>.
- Pacheco, H., Díaz-López, Stephanie 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, 100674. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100674>.
- Peña, S. E. (2018). Impacto de la contaminación atmosférica en dos principales ciudades del Ecuador. *Revista Universidad y Sociedad*, 10(2), 289–293.
- Petroni, M., Hill, D., Younes, L., Barkman, L., Howard, S., Howell, B. I., Mirowsky, J., & Collins, M. B. (2020). Hazardous air pollutant exposure as a contributing factor to COVID-19 mortality in the United States. *Environmental Research Letters*, 15(9), 0940a9. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abaf86>.
- Pulido, H., & De la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos* (McGraw-Hil).
- Ramírez, L., & Lilián, V. (2015). *Autocorrelación espacial: Analogías y diferencias entre el índice de Moran y el índice Getis y Ord. Aplicaciones con indicadores de acceso al agua en el norte argentino*.
- Ramírez, M. Á. (2017). Uso de Modelos Lineales Generalizados (MLG) para la interpolación espacial de PM₁₀ utilizando imágenes satelitales Landsat para la ciudad de Bogotá, Colombia. *Perspectiva Geográfica*, 22(2), 105–121. <https://doi.org/10.19053/01233769.5600>.
- Razali, M. N., & Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. *Journal of Statistical Modeling and*

- Analytics*, 2(1), 21–33.
- Ren, M., Li, N., Wang, Z., Liu, Y., Chen, X., Chu, Y., Li, X., Zhu, Z., Tian, L., & Xiang, H. (2017). The short-term effects of air pollutants on respiratory disease mortality in Wuhan, China: Comparison of time-series and case-crossover analyses. *Scientific Reports*, 7, 40482. <https://doi.org/10.1038/srep40482>.
- Reyna, S. E. (2019). *Validación de Procesos 1: Test estadísticos para comparar medias / medianas de distintos lotes - Inferencia estadística*.
- Rich, D. Q. (2017). Accountability studies of air pollution and health effects: lessons learned and recommendations for future natural experiment opportunities. *Environment International*, 100, 62–78. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.019>.
- Rivas Ruiz, R., Moreno Palacios, J., & Talavera, J. (2013). Diferencias de medianas con la U de Mann-Whitney. *Rev Med Inst Mex Seguro*, 51(4), 414–419.
- Riveros, R. (2017). *Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs) en la industria de pinturas y sus disolventes en Perú- Análisis de caso y estrategias de gestión ambiental y salud ocupacional*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Romero-Saldaña, M. (2016). Pruebas de bondad de ajuste a una distribución normal. *Revista Enfermería Del Trabajo*, 6(3), 105–114.
- Romero Placeres, M., Olite, D. F., & Álvarez, M. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 44(2), 1561–3003. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-30032006000200008&lng=es&tlng=en.
- Rubio, M. J., & Berlanga, V. (2012). Cómo aplicar las pruebas paramétricas bivariadas t de Student y ANOVA en SPSS. Caso práctico. *Reire*, 5(2), 83–100.
- Santana, L. M., Escobar, L. A., & Capote, P. A. (2010). Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite. *Revista de Geografía Norte Grande*, 45, 77–95.

34022010000100006.

- Schneider, P., Castell, N., Vogt, M., Dauge, F. R., Lahoz, W. A., & Bartonova, A. (2017). Mapping urban air quality in near real-time using observations from low-cost sensors and model information. *Environment International*, *106*, 234–247. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2017.05.005>.
- Secretaría del Ambiente. (2018). *Informe de Calidad del Aire en Quito. Distrito Metropolitano de Quito: Secretaría del Ambiente*. http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/images/Secretaria_Ambiente/red_monitoreo/informacion/Informe_Calidad_Aire_2018.pdf.
- Shin, S., Bai, L., Oiamo, T. H., Burnett, R. T., Weichenthal, Scott Jerrett, M., Kwong, J. C., Goldberg, M. S., Copes, R., Kopp, A., & Chen, H. (2020). Association between road traffic noise and incidence of diabetes mellitus and hypertension in Toronto, Canada: a population-based cohort study. *Journal of the American Heart Association*, *9*(6), e013021. <https://doi.org/10.1161/JAHA.119.013021>.
- SNGRE. Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (2020). *Informe de Situación – Actividad Volcánica*. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2019/12/Informe-No-03-AV-Sangay-13122019.pdf>.
- Tirado, G., & Tirado, D. N. (2017). *Tratado de estadística experimental* (Cenid). Guadalajara, Jalisco, México D.F.
- Ubilla, C., & Yohannessen, K. (2017). Outdoor air pollution respiratory health effects
UTDOOR AIR POLLUTION RESPIRATORY HEALTH EFFECTS IN
CHILDREN. *Revista Médica Clínica Las Condes*, *28*(1), 111–118. <https://doi.org/10.1016/j.rmcl.2016.12.003>.
- Valls, M. J. (2017). Efectos de la calidad del aire sobre la salud. *Formación Médica Continuada En Atención Primaria*, *24*(9), 511–514. <https://doi.org/10.1016/j.fmc.2017.03.004>.
- van Geffen, J., Eskes, H. J., Boersma, K. F., Maasakkers, J. D., & Veefkind, J. P. (2019). TROPOMI ATBD of the total and tropospheric NO₂ data products. *DLR*

Document., 1.4.0.

- Veefkind, J. P., Aben, I., Mc.Mullan, K., Förster, H., de Vries, J., Otter, G., Claas, J., Eskes, J. H., de Haan, J. F., Kleipool, Q., Weele, M. va., Hasekamp, O., Landgraf, J., Snel, R., Tol, P., Ingmann, P., Voors, R., & 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. E. (2018). *Ánàlisis 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*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- West, J., Cohen, A., Dentener, Frank Brunekreef, B., Zhu, T., Armstrong, B., Bell, M., Brauer, M., Carmichael, G., Costa, D., Dockery, D., Kleeman, M., Krzyzanowski, M., Künzli, N., Liousse, C., Lung, S.-C., Martin, R., Pöschl, U., Pope, A., Roberts, J., ... Wiedinmyer, C. (2016). What We Breathe Impacts Our Health: Improving Understanding of the Link between Air Pollution and Health. *Environmental Science & Technology*, *50*(10), 4895–4904. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03827>.
- Wong-González, E. (2010). ¿Después de un análisis de variancia ...qué? Ejemplos en ciencia de alimentos. *Agronomía Mesoamericana*, *21*(2), 349–356.
- Wu, X., Nethery, R. C., Sabath, B. M., Braun, D., & Dominici, F. (2020). Exposure to air pollution and COVID-19 mortality in the United States: A nationwide. *MedRxiv*. <https://doi.org/10.1101/2020.04.05.20054502>.
- Xiaoju, L., Siti Aslina, H., Shafreeza, S., & Said, M. S. M. (2021). Overviewing the air quality models on air pollution in Sichuan Basin, China. *Chemosphere*, *271*, 129502. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129502>.
- Yassi, A., Kjellström, T., de Kok, T., & Guidotti, T. L. (2002). *Salud Ambiental Básica* (Programa d).

- Zheng, Z., Yang, Z., Wu, Z., & Marinello, F. (2019). Spatial Variation of NO₂ and Its Impact Factors in China: An Application of Sentinel-5P Products. *Remote Sensing*, 11(16), 1939. <https://doi.org/10.3390/rs11161939>.
- Zweers, S. (2018). *TROPOMI ATBD of the UV aerosol index. 1.1*.

Anexos