

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

**PROGRAMA EDUCATIVO DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA
AMBIENTAL Y TECNOLOGÍAS SUSTENTABLES**

TEMA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:

“EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN AMBIENTAL DE OZONO
TROPOSFÉRICO, DURANTE LA CONTINGENCIA SANITARIA DEL COVID-19, EN
EL MUNICIPIO DE CUERNAVACA, MORELOS”

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y TECNOLOGÍAS SUSTENTABLES

NOMBRE DEL ALUMNO:

JULIO CÉSAR BOTELLO BOTELLO.

NOMBRE DEL TUTOR:

DR. MARIO ALFONSO MURILLO TOVAR.

NOMBRE DEL COTUTOR:

DR. JOSÉ ABRAHAM ORTÍNEZ ÁLVAREZ

CUERNAVACA, MORELOS

DICIEMBRE, 2022.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
1.-Introducción.....	13
2.-Antecedentes.....	15
3.-Marco teórico.....	21
3.1.-Estructura y composición de la atmósfera.....	21
3.1.2-Ozono en la estratosfera.....	22
3.2-Normatividad y gestión de la contaminación atmosférica urbana.....	23
3.3-Clasificación de los contaminantes atmosféricos.....	27
3.3.1-Contaminantes criterio.....	28
3.3.2 -Contaminantes atmosféricos tóxicos.....	30
3.4-Ozono troposférico.....	31
3.5-Técnicas de medición de contaminantes criterio.....	35
3.6-Equipos de medición.....	36
3.7-Técnicas de medición de parámetros meteorológicos.....	40
3.7.1-Sensores meteorológicos.....	40
3.8.-Efecto de fin de semana (EFS).....	43
3.9.-Isopletas: herramientas utilizadas para la gestión de la calidad del aire.....	44
3.10.-Teledetección: mediciones satelitales.....	46
3.11.-Zona de estudio – estado de Morelos.....	49
3.12-Gestión de la calidad del aire en Morelos.....	51
4.-Planteamiento y justificación del problema de la investigación.....	54
5.- Hipótesis.....	55
6.-Objetivos.....	56
7.-Diseño experimental.....	57
8.-Estrategia experimental.....	58
9.- Materiales y métodos.....	59
9.1-Ubicación del sitio de monitoreo.....	59

9.1.1.-Análisis estadístico de datos.....	61
9.1.2.- Distribución y estadística descriptiva de los registros ambientales de ozono.....	62
9.1.3.-Análisis comparativo con la normatividad vigente a nivel nacional e internacional.....	62
9.1.4.-Comparación de promedios y medianas durante la temporada seca-cálida.....	62
9.1.5.- Efecto de la temporada en la concentración ambiental de ozono.....	63
9.1.6.- Efecto de fin de semana (EFS) de O ₃ y NO ₂	63
9.1.7.- Percepción remota para estudios de calidad del aire.....	64
9.1.8.-Análisis de modelación con isopletras.....	64
9.2-Captura y validación de registros diarios.....	60
9.3-Captura y validación de imágenes satelitales.....	61
10.-Resultados y discusión.....	65
10.1-Distribución y estadística básica de los registros ambientales de ozono.....	65
10.2.-Análisis comparativo de ozono frente a la normatividad nacional e internacional.....	69
10.3-Efecto estacional en la concentración ambiental de ozono.....	73
10.4-Efecto del confinamiento sobre los niveles ambientales de ozono.....	78
10.5.- Efecto de fin de semana (EFS) de O ₃	85
10.5.1. Efecto de fin de semana (EFS), para el NO ₂	87
10.6- Distribución espacial de las columnas promedio de NO ₂	89
10.7- Distribución espacial de las columnas promedio de HCHO.....	93
10.8- Distribución espacial de las columnas promedio de CO.....	96
10.9-Modelación con isopletras: herramienta para la gestión de la calidad del aire.....	99
11.-Conclusiones.....	107
12.- Recomendaciones	110
13.-Bibliografía y fuentes de consulta.....	111
Anexos.....	119

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
1. Equipo O ₃ Analyzer – Model T400.....	36
2. Equipo CO Analyzer - Model T300.....	37
3. Equipo NO ₂ Analyzer – Model T500U.....	37
4. Equipo SO ₂ Analyzer – Model T100.....	38
5. Equipos de medición de PM ₁₀ y PM _{2.5} BAM 1020.....	39
6. Sensor de velocidad del viento. Fuente: Manual 3. Redes, Estaciones y Equipos de Medición de la Calidad del Aire, INECC.....	41
7. Sensor de dirección del viento. Fuente: Manual 3. Redes, Estaciones y Equipos de Medición de la Calidad del Aire, INECC.....	41
8. Sensor de medición de temperatura (Resistance Temperature Detectors). Fuente: Manual 3. Redes, Estaciones y Equipos de Medición de la Calidad del Aire, INECC.....	42
9. Sensor de medición de humedad relativa. Imagen tomada de internet. https://www.fisiorespiracion.es/ . Fecha de consulta: 03 de septiembre de 2022.....	43
10. Representación esquemática (isopleta) de la relación de las concentraciones de NO _x y COV presentes en la atmósfera y las posibles concentraciones resultantes de la reducción de ozono por su reacción química (Colin, 2014).....	45
11. Municipio de Cuernavaca, Morelos. Fuente: Elaboración propia con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2022).....	50
12. Diagrama de flujo de las actividades experimentales.....	57
13. Diagrama de flujo de estrategia de análisis de los datos.....	58
14. Ubicación del Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire en la ciudad de Cuernavaca (punto azul). Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI.....	59
15. Coordenadas UTM de la estación de monitoreo en la ciudad de Cuernavaca, Morelos. Fuente: Elaboración propia con Google Earth.....	60
16. Histograma de frecuencias para las concentraciones de ozono (ppm) 2019.....	65
17. Concentraciones de ozono 2019.....	66

18. Histograma de frecuencias para las concentraciones ambientales de ozono (ppm) 2020.....	66
19. Concentraciones de ozono 2020.....	67
20. Histograma de frecuencias para las concentraciones ambientales de ozono (ppm) 2021.....	67
21. Concentración de ozono troposférico 2021.....	68
22. Análisis comparativo de los registros horarios de ozono con los límites máximos permisibles de la NOM, EPA y la ONU para el año 2019.....	69
23. Análisis comparativo de los promedios diarios de ozono con límites máximos permisibles de la NOM, EPA y la ONU para el año 2019.....	70
24. Análisis comparativo de los registros horarios de ozono con los límites máximos permisibles de la NOM, EPA y la ONU para el año 2020.....	71
25. Análisis comparativo de los promedios diarios de ozono con límites máximos permisibles de la NOM, EPA y la ONU para el año 2020.....	71
26. Análisis comparativo de los registros horarios de ozono con los límites máximos permisibles de la NOM, EPA y la ONU para el año 2021.....	72
27. Análisis comparativo de los promedios diarios de ozono con límites máximos permisibles de la NOM, EPA y la ONU para el año 2021.....	72
28. Análisis comparativo de los niveles de ozono por temporada para el año 2019.....	74
29. Análisis comparativo de los niveles de ozono por temporada para el año 2020.....	75
30. Análisis comparativo de los niveles de ozono por temporada para el año 2021.....	76
31. Análisis comparativo de los niveles de ozono durante la temporada seca-cálida para el año 2019, 2020 y 2021.....	77
32. Concentración ambiental de ozono troposférico de 2019 y 2020.....	78
33. Porcentaje de los componentes principales para ozono 2019.....	80
34. Comparación de concentraciones ambientales de ozono troposférico.....	80
35. Porcentaje de los componentes principales para ozono 2020.....	82
36. Porcentaje de los componentes principales para ozono 2021.....	84
37. Comparación diaria de medias de las concentraciones de ozono 2019.....	85
38. Comparación diaria de medias de las concentraciones de ozono 2020.....	86

39. Comparación diaria de medias de las concentraciones de ozono 2021.....	86
40. Comparación diaria de medias de las concentraciones de NO ₂ para el año 2019.....	87
41. Comparación diaria de medias de las concentraciones de NO ₂ para el año 2020.....	88
42. Comparación diaria de medias de las concentraciones de NO ₂ para el año 2021.....	88
43. Distribución espacial de las columnas promedio de NO ₂ para el periodo de marzo a mayo del 2019.....	90
44. Distribución espacial de las columnas promedio de NO ₂ para el periodo de marzo a mayo del 2020.....	91
45. Distribución espacial de las columnas promedio de NO ₂ para el periodo de marzo a mayo del 2021.....	92
46. Distribución espacial de las columnas promedio de HCHO para el periodo de marzo a mayo del 2019.....	93
47. Distribución espacial de las columnas promedio de HCHO para el periodo de marzo a mayo del 2020.....	94
48. Distribución espacial de las columnas promedio de HCHO para el periodo de marzo a mayo del 2021.....	95
49. Distribución espacial de las columnas promedio de CO para el periodo de marzo a mayo del 2019.....	96
50. Distribución espacial de las columnas promedio de CO para el periodo de marzo a mayo del 2020.....	97
51. Distribución espacial de las columnas promedio de CO para el periodo de marzo a mayo del 2021.....	98
52. Representación bidimensional del diagrama de Isopletras como estrategia de control para la formación de O ₃ durante el 18 de mayo del 2020.....	100
53. Representación bidimensional del diagrama de Isopletras como estrategia de control para la formación de O ₃ durante el 19 de mayo del 2020.....	101
54. Representación bidimensional del diagrama de Isopletras como estrategia de control para la formación de O ₃ durante el 20 de mayo del 2020.....	102
55. Representación bidimensional del diagrama de Isopletras como estrategia de control para la formación de O ₃ durante el 21 de mayo del 2020.....	103

56. Representación bidimensional del diagrama de Isopletras como estrategia de control para la formación de O ₃ durante el 22 de mayo del 2020.....	104
57. Representación bidimensional del diagrama de Isopletras como estrategia de control para la formación de O ₃ durante el 23 de mayo del 2020.....	105
58. Representación bidimensional del diagrama de Isopletras como estrategia de control para la formación de O ₃ durante el 24 de mayo del 2020.....	106
ANEXO A. Oficio realizado para solicitar la información ambiental a la Secretaría de Desarrollo Sustentable del estado de Morelos.....	119
ANEXO B. Resumen estadístico de las concentraciones ambientales de ozono (ppm) 2019.....	120
ANEXO C. Resumen de estadísticos para la concentración de ozono en parte por millón 2020.....	121
ANEXO D. Resumen de estadísticos para la concentración de ozono en parte por millón 2021.....	122
ANEXO E. Histograma de frecuencia de los niveles de ozono troposférico (ppm) 2019 (gris) y 2020 (verde).....	123
ANEXO E. Comparación de las medianas de dos muestras independientes 2019 y 2020.....	123
ANEXO E. Medidas de tendencia central de los niveles ambientales de ozono (ppm) 2019.....	123
ANEXO E. Medidas de tendencia central de los niveles ambientales de ozono (ppm) 2020.....	123
ANEXO E. Medidas de tendencia central de los niveles ambientales de ozono (ppm) 2021.....	123
ANEXO F. Comparación mensual de las concentraciones de ozono (ppm) 2019 con los LMP de la NOM, EPA US y OMS.....	125
ANEXO G. Comparación del promedio mensual de las concentraciones de ozono (ppm) 2020 con los LMP de la NOM, EPA US y OMS.....	125
ANEXO H. Comparación del promedio mensual de las concentraciones de ozono (ppm) 2021 con los LMP de la NOM, EPA US y OMS.....	126
ANEXO I. Correlación de las concentraciones de ozono 2019.....	127

ANEXO I. Correlación de las concentraciones de ozono 2020.....	129
ANEXO I. Correlación de las concentraciones de ozono 2021.....	130
ANEXO J. Porcentaje de los componentes principales para ozono 2019.....	132
ANEXO J. Porcentaje de los componentes principales para las concentraciones de ozono 2019.....	132
ANEXO J. Porcentaje de los componentes principales para ozono 2020.....	132
ANEXO J. Porcentaje de los componentes principales para las concentraciones de ozono 2020.....	133

GLOSARIO DE TÉRMINOS

1. ARSET	Applied Remote Sensing Training Program
2. CAME	Comisión Ambiental de la Megalópolis
3. CDMX	Ciudad de México
4. CO	Monóxido de carbono
5. COVID-19	Virus SARS-CoV2
6. COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
7. CH ₄	Metano
8. DV	Dirección del viento
9. HCHO	Formaldehído
10. IE	Inventario de Emisiones
11. IMECA	Índice Metropolitano de la Calidad del Aire
12. INCA	Informe Nacional de la Calidad del Aire
13. INEEC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
14. INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
15. IQAIR	Index Quality Air
16. KM	Kilómetros
17. LMP	Límite Máximo Permisible
18. MSNM	Metros Sobre el nivel del Mar
19. NASA	Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio
20. NO	Monóxido de nitrógeno
21. NO _x	Óxidos de nitrógeno
22. NO ₂	Dióxido de nitrógeno
23. NO ₃	Trióxido de nitrógeno
24. NOM	Norma Oficial Mexicana
25. NMX	Norma Mexicana Técnica
26. PM ₁₀	Partículas menor o igual a 10 microgramos
27. PM _{2.5}	Partículas menor o igual a 2.5 microgramos
28. PPM	Partes por millón
29. PST	Partículas Sólidas Totales

30. PROAIRE	Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire
31. RAMA	Red Automática de Monitoreo Atmosférico
32. RS	Radiación solar
33. RO ₂	Radical Orgánico Peroxilo
34. SINAICA	Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire
35. SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
36. SEDEMA	Secretaría de Medio Ambiente
37. SO ₂	Dióxido de azufre
38. SDS	Secretaría de Desarrollo Sustentables
39. SIMAT	Sistema de Monitoreo Atmosférico
40. SMCA	Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire
41. TROPOMI	Tropospheric Monitoring Instrument
42. •OH	Radical hidroxilo
43. OMI	Ozone Monitoring Tropospheric
44. OMS	Organización Mundial de la Salud
45. O ₃	Ozono
46. US EPA	United States, Environment Protection Agency
47. UTM	Universal Transversal de Mercator
48. VV	Velocidad del viento
49. ZMC	Zona Metropolitana de Cuernavaca.
50. ZMVM	Zona Metropolitana del Valle de México.

AGRADECIMIENTOS

A todas aquellas personas que participaron directa e indirectamente durante la elaboración de esta investigación científica. ¡Muchísimas gracias por su apoyo brindado! Principalmente, debo agradecer al Dr. Mario Alberto Murillo Tovar quien sin su apoyo no hubiera sido posible realizar la tesis.

A Patricia, Sofia Michelle y Lili Gladys, y a todos mis compañeros de la maestría por su compañerismo.

De igual manera, quiero agradecer nuevamente la Universidad Autónoma del Estado de Morelos por darme nuevamente la confianza y apoyar y fortalecer mis conocimientos y habilidades para continuar con mi desarrollo profesional.

También agradezco a la coordinación del Programa Educativo de la Maestría en Ingeniería Ambiental y Tecnologías Sustentables (MIATS), por el apoyo y las facilidades otorgadas durante la realización de los estudios de maestría. Asimismo, agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por otórgame una beca.

DEDICATORIA

Este trabajo de grado es dedicado a mi familia quienes por ellos soy lo que soy. Especialmente, lo dedico a mi madre Ma Eugenia Botello Landa como un homenaje al apoyo incondicional que me ha dado y al gran ser humano que es. Me has dado todo, mis valores, mi carácter, mis principios, mi tenacidad y perseverancia para alcanzar mis objetivos. ¡Muchísimas gracias por los consejos, los regaños, el apoyo y por el amor que me das en todo momento!

A la memoria de mi padre Abel Botello, quien estoy seguro estaría orgulloso de los que soy y de lo que hemos logrado. También, dedico este trabajo a mis hermanos Erick, Sharon y Roxibell quienes siempre me han apoyado y están presentes en todo momento. A mis sobrinos Marcela y Samuel quienes son mi completa motivación y mi felicidad.

A mis amigos que durante todo este tiempo me han acompañado y apoyado a concluir mi formación académica. ¡También le agradezco a Ana Laura por estar!

RESUMEN

Este trabajo se realizó en el marco de la contingencia sanitaria generada por el virus SARS-CoV2 (COVID-19), y la reducción de actividades no esenciales en los sectores público, privado y social, correspondiente entre el 23 de marzo y al 30 de mayo del 2020, con la finalidad de conocer el efecto del confinamiento en las emisiones de sus precursores y comportamiento de ozono en Cuernavaca, Morelos.

En este trabajo de investigación se realizó el análisis de las concentraciones horarias, diarias, mensuales y anuales del ozono previo al confinamiento en 2019, durante 2020, y en el 2021, para identificar los cambios en los niveles de contaminación, así como también, se evaluó la relación con sus principales gases precursores, y con las variables meteorológicas para conocer su nivel de asociación. Se estudió el análisis de Efecto de Fin de Semana (EFS), para identificar bajo que régimen de formación fotoquímica se encuentra el ozono troposférico en la zona de estudio.

Asimismo, se realizó un diagnóstico y evaluación de las columnas de dióxido de nitrógeno (NO_2), formaldehído (HCHO), y de monóxido de carbono (CO) como proxy de compuestos orgánicos volátiles (COV), mediante el uso de imágenes satelitales generadas con el instrumento de percepción remota TROPOMI que se encuentra a bordo de la plataforma satelital Sentinel-5P, el cual tiene una resolución espacial de 3.5 km x 5.5 km. De igual manera, se implementó el uso de isopletas para estudiar la relación de estos contaminantes con la concentración de ozono, con la finalidad de identificar el nivel óptimo de los gases de sus precursores para que este contaminante secundario no incumpla los estándares de normatividad a nivel nacional e internacional.

Los resultados obtenidos en esta evaluación permitieron conocer que, en Cuernavaca, Morelos, la concentración ambiental de O_3 tuvo un comportamiento diferente en comparación con el año anterior en el mismo periodo de tiempo a pesar de las reducciones en las emisiones de sus gases precursores, esto nos permitió conocer y entender mejor el problema de la contaminación atmosférica, y analizar los límites a los cuales se deben de reducir las emisiones de sus gases precursores para mejorar la calidad del aire.

1.-INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire es uno de los problemas ambientales más importante que las zonas urbanas enfrentan hoy en día debido a la presencia de altas concentraciones de contaminantes primarios, emitidos principalmente por procesos industriales y actividades del transporte, y de contaminantes secundarios generados en la atmósfera a través de reacciones fotoquímicas (Salcedo et al, 2012).

En los centros urbanos, se han implementado diversas acciones para reducir la cantidad de emisiones a la atmósfera y mejorar la calidad del aire, por ejemplo: El programa Hoy No Circula, el Programa de Verificación Vehicular, las Normas Oficiales Mexicanas (NOM'S), el Programa Para Mejorar la Calidad del Aire (PROAIRE), entre otros (Colin, 2014).

Un ejemplo de la utilidad de esas acciones es en la Ciudad de México, en donde se ha observado una disminución en las concentraciones de algunos contaminantes criterios durante las últimas décadas. A su vez, estudios recientes han determinado que el diseño y aplicación de políticas públicas para mejorar la calidad del aire han tenido beneficios para la salud, aumentando la esperanza de vida de la población. Sin embargo, hay contaminantes que siguen sobrepasando los niveles máximos establecidos, como lo son el ozono troposférico y las partículas, lo cual es un reto mayúsculo para mejorar la calidad del aire en las megas ciudades (IE, 2016).

Uno de los problemas que dificulta el control de la generación del ozono a nivel de superficie, es que en México no existe normatividad que regule las emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), lo que dificulta el diseño e implementación de medidas de control más efectivas.

Es un hecho sin precedentes en décadas recientes, que las emisiones de algunos contaminantes del aire disminuyeron en muchas ciudades durante la implementación del cierre temporal de actividades no esenciales derivado de la contingencia sanitaria por la pandemia del COVID-19 (SARS-COV-19). Esto se convirtió en un escenario oportuno para conocer mejor el comportamiento y asociación entre los contaminantes atmosféricos y los procesos que los originan. En este trabajo se pretende explorar el efecto que tuvo la restricción de actividades de la población en los niveles de ozono troposférico. Las

concentraciones ambientales del ozono troposférico y las variables meteorológicas que se obtuvieron a través del Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire (SMCA), y se examinaron bajo tres escenarios distintos prepandemia (2019), pandemia (2020) y “nueva normalidad” (2021), en la ciudad de Cuernavaca, Morelos. En cada caso se determinó la excedencia de los niveles respecto a la normatividad mexicana e internacional y se analizó, el régimen de sensibilidad de formación por los óxidos de nitrógeno y/o los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), mediante mediciones en superficie, satelitales y el uso de isopletras.

2.-ANTECEDENTES

Los problemas ambientales y de salud por el deterioro de la calidad del aire en el planeta y en particular en México se han generalizado debido al crecimiento demográfico incontrolado, el crecimiento industrial en zonas urbanas y al incremento del consumo de combustibles fósiles para las actividades humanas (INECC, 2000). Con la finalidad de proteger la salud de la población, se han estandarizado el monitoreo y el reporte de la calidad del aire en las principales zonas metropolitanas del país (SIMAT, 2016).

Por ejemplo, en las ciudades el material particulado con diámetro menor o igual a 10 y 2.5 micrómetros junto con el dióxido de nitrógeno y ozono troposférico son considerados los contaminantes atmosféricos más peligrosos por los efectos nocivos que pueden causar a la salud humana asociadas con las enfermedades respiratorias y cardiovasculares.

En la pandemia por el virus SARS-CoV2 (COVID-19), en algunos países de Europa, se analizaron los registros diarios de las concentraciones ambientales de ozono troposférico, material particulado y los óxidos de nitrógeno, así como también, se cuantificaron los porcentajes de reducción de estos contaminantes atmosféricos en comparación con el mismo periodo en 2017-2019 (P. Sicard et al, 2020).

Los resultados indicaron que las concentraciones diarias de ozono tuvieron un aumento del 24 % en la ciudad de Niza en Francia, un 14 % de aumento en la ciudad de Roma, y un aumento del 27 % en la ciudad de Turín en Italia. De igual forma, se registró un aumento del 3.6 % en la ciudad de Valencia en España, y un aumento del 36 % en la ciudad de Wuhan en China durante el confinamiento por la pandemia. Sicard et al, 2020, encontraron que el aumento en las concentraciones de ozono se debió a la disminución de las emisiones de los NO_x.

En ese mismo sentido, y casi un mes después del cierre total, principalmente en la ciudad de Wuhan en China; donde se identificaron los primeros casos de la enfermedad por coronavirus, se observó una reducción en los niveles de contaminantes atmosféricos incluido el ozono en comparación con el mismo periodo del año 2019. Ver el sitio web: <https://www.atmosfera.unam.mx/pandemia-por-covid-19-un-respiro-para-el-planeta/>

El 13 de marzo de 2020, con apoyo de las herramientas del satélite Copernicus Sentinel-5P, la Agencia Espacial Europea también reveló una reducción de la contaminación por dióxido de nitrógeno (NO_2), particularmente en el norte de Italia, zona que se convertiría en un nuevo epicentro de la pandemia. Así como también, para el 28 de marzo, de acuerdo con **IQAir**, la ciudad de Los Ángeles mostraba concentraciones ambientales menores en mucho tiempo, pues la concentración de partículas suspendidas con un diámetro menor o igual a 2.5 micras habían descendido en un 51 % con respecto al promedio de los últimos años para la misma fecha. Ver el sitio web: <https://www.atmosfera.unam.mx/pandemia-por-covid-19-un-respiro-para-el-planeta/>

La implementación del cierre temporal por la contingencia sanitaria del COVID-19, provocó también la disminución de las emisiones y las concentraciones ambientales de los principales contaminantes criterio donde el cambio parece ser muy notorio en los sitios con mayor reducción de actividades no esenciales (Peralta et al, 2020). Por ejemplo, el Banco Interamericano de Desarrollo señaló que, al cierre de marzo, las ciudades que instauraron una “cuarentena total” como Lima o Bogotá mostraron una disminución de hasta 60 % en las emisiones de dióxido de nitrógeno. Mientras tanto, en ciudades con medidas menos estrictas, como Río de Janeiro o la Ciudad de México, la caída en la concentración de ese gas ha sido menor al 40 %. Debido a la falta de monitoreo de especies químicas en superficie terrestre, especialmente de COVs, diversos investigadores han empleado las mediciones satelitales del formaldehído (HCHO) y las densidades de columnas del dióxido de nitrógeno (NO_2), como indicadores para estudiar y poder describir los cambios espaciales y temporales de algunos contaminantes, por ejemplo: Los COVs y los óxidos de nitrógeno. Ver el sitio web: <https://blogs.iadb.org/efectividad-desarrollo/es/que-nos-dice-la-calidad-del-aire-sobre-la-respuesta-de-america-latina-y-el-caribe-a-la-crisis-del-coronavirus/>

En formar similar, en México durante el análisis de los datos de la calidad del aire obtenidos por la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), mostraron una clara disminución en las concentraciones horarias de algunos contaminantes primarios y secundarios por la reducción de actividades urbanas por el COVID-19. Sin embargo, las

concentraciones del ozono troposférico en la Ciudad de México (CDMX), no mostraron una disminución significativa durante el cierre temporal por la contingencia sanitaria (Peralta et al, 2020). Asimismo, se han observado concentraciones ambientales mayores de ozono troposférico a lo que establecen los límites permisibles, inclusive, la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME), ha activado la fase 1 de la contingencia ambiental con sus respectivas medidas correctivas por las altas concentraciones de ozono en la zona metropolitana, a pesar de que se redujeron considerablemente las concentraciones de uno de los precursores, como el dióxido de nitrógeno. De acuerdo con (Torres-Jardón, 2004), la sensibilidad a la formación de ozono troposférico en la Ciudad de México ha sido reconocida como sensible a los Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs).

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) en 2021, realizó una evaluación de calidad del aire en el estado de Hidalgo durante la emergencia sanitaria generada por el virus SARS-CoV2 (COVID-19), con la finalidad de cuantificar las reducciones de las concentraciones de contaminantes atmosféricos registrados en las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico del Estado de Hidalgo. Los resultados indicaron que, durante el análisis de las tendencias de marzo a junio del 2017 al 2020 con datos de 10 estaciones, la concentración de ozono rebasó los valores máximos permisibles en el aire ambiente como promedio móvil de 8 horas en cinco estaciones con base en los límites de la NOM-020-SSA1-2014. Sin embargo, se observó una reducción considerable para el año 2018, incrementándose nuevamente en el año 2019 y durante el año 2020 se mantuvo en la mayoría de los días por debajo de la norma con excepción de 3 estaciones, y también se observó que, en todos los años analizados la concentración de ozono sobrepasó el límite establecido por parte de la OMS de 50 ppm, siendo el año 2020 en el que menos se sobrepasó este límite (INECC, 2021).

En forma similar, y con el objetivo de identificar el impacto debido al confinamiento temporal por el COVID-19, en la cuenca de Tula y Pachuca se presentó la misma distribución con una mayor concentración de ozono en los meses de abril y mayo, y una menor concentración de ozono en el mes de junio. Es decir, en la cuenca de Tula se presentó una reducción en los niveles de ozono en todas las estaciones, con un porcentaje

máximo de reducción del 14 %. En general el porcentaje de reducción del año 2019 al año 2020 fue de 19 %. Sin embargo, en la cuenca de Pachuca se observa que los niveles de ozono se redujeron en todas las estaciones en el año 2020, con un porcentaje máximo de reducción del 17 %. En general se redujeron los días en los cuales se rebasa el límite máximo normado de 0.095 ppm, como promedio de 1 hora (NOM-020-SSA1-2014) con excepción del año 2019. El porcentaje de reducción del año 2019 al año 2020 fue de 28 %. Asimismo, se realizó un diagnóstico y evaluación de las columnas de dióxido de nitrógeno (NO_2) y formaldehído (HCHO) como proxy de compuestos orgánicos volátiles (COV) en las cuencas atmosféricas de Tula y Pachuca mediante el uso de imágenes satelitales generadas por TROPOMI, en la cual se compararon los valores observados en los periodos de marzo a junio de 2019 y 2020. La columna NO_2 en el año 2019, presentó una densidad atmosférica en Tula de $131 \mu\text{mol}/\text{m}^2$, en el año 2020 la columna NO_2 presentó un descenso y tuvo una densidad atmosférica de $91 \mu\text{mol}/\text{m}^2$, esto representó una reducción del 27 % en comparación con el año anterior. En esta cuenca se encontró también que la columna de HCHO también disminuyó en un 25 % respecto al año 2019. Por su parte, en la cuenca de Pachuca también presentó un descenso en la densidad de la columna atmosférica de NO_2 en el año 2020 donde se alcanzaron valores entre 10 y $50 \mu\text{mol}/\text{m}^2$ mientras que en el 2019 los valores fueron de entre 10 y $75 \mu\text{mol}/\text{m}^2$, por lo tanto, la disminución fue 33 %. Por último, el INECC también identificó que el ozono troposférico disminuyó un 15% al comparar el año 2019 con el 2020 con base en las mediciones in situ de la red de monitoreo atmosférico (INECC, 2021).

En ese sentido, la Secretaría de Medio Ambiente del Estado de México de manera conjunta con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático en el 2020, realizaron una evaluación de las concentraciones de contaminantes atmosféricos registrados en las estaciones de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), durante el periodo del 23 de marzo al 30 de mayo, con el objetivo de identificar el impacto generado por la implementación de la Jornada Nacional de Sana Distancia por el COVID-19, observando que las concentraciones de ozono presentaron una reducción en todas las estaciones, con un porcentaje máximo de reducción del 20%, y una reducción en los días en los cuales se rebasa el límite máximo normado de

0.095 ppm, como promedio de 1 hora con base en la NOM-020- SSA1-2014 (INECC, 2020).

Por último, también realizaron la evaluación de las columnas de dióxido de nitrógeno y formaldehído en la ZMVT mediante el uso de imágenes satelitales durante el periodo de contingencia sanitaria. Los resultados mostraron una reducción de NO_2 en el 2020 en el área de impacto con respecto al mismo periodo del año anterior. Para el 2019, durante el periodo de marzo-mayo, se estimó un área de 716 km^2 y en contraste para el 2020 de 394 km^2 , siendo una reducción aproximada del 45 %. De igual forma, para el HCHO se calculó un área mucho menor de 97 km^2 en el 2019 y de 54 km^2 en el 2020 lo que indica un porcentaje de disminución del 44 % en la ZMVT.

Existen muy pocos trabajos publicados sobre la contaminación atmosférica en el estado de Morelos. Las campañas intermitentes realizadas en la ZMC indican que el ozono suele exceder la norma existente de 0.070 ppm, media de ocho horas. Aparentemente, los precursores provienen esencialmente de emisiones del parque vehicular en la zona de Cuernavaca. De acuerdo con el Informe Nacional de la Calidad del Aire 2018, la concentración máxima de 1 hora registrada en esta misma estación se mantuvo dentro del límite normado (0.095 ppm).

En el año 2011, se llevó a cabo un estudio regional de la calidad del aire al sur de la ciudad de México que abarcó parte del estado de Morelos. Dicho estudio (Salcedo et al., 2012) contó con el muestreo y el análisis de los contaminantes criterio (O_3 , NO_x , CO, SO_2 , PM). Aunque los contaminantes se mantuvieron por debajo a lo establecido por las normas, se obtuvieron registros máximos de ozono que pueden representar también riesgos para los habitantes de la Zona Metropolitana de Cuernavaca (ZMC) y sus alrededores. Así mismo, se observa que se desconocen las condiciones ambientales y episodios que pudieron haber detonado estos altos niveles de ozono.

Por otra parte, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), elaboró en 2018, **el Informe Nacional de Calidad del Aire 2018**. Es importante mencionar, que el

documento ha sido realizado con la finalidad de contar con un diagnóstico técnico que brinde más información para la evaluación de los indicadores ambientales y generar nuevas políticas públicas y/o fortalecer la red de monitoreo nacional. El informe presenta el siguiente resultado durante la medición para el ozono troposférico en el estado de Morelos: En la ciudad de Cuernavaca, Morelos el ozono troposférico se incumplió debido a que se rebasó el límite normado de 8 horas, al alcanzar una concentración de 0.076 ppm, que es equivalente a 1.1 veces el valor límite normado (0.070 ppm). La concentración máxima de 1 hora registrada en esta misma estación se mantuvo dentro de norma (INECC, 2018).

En el **Informe Nacional de la Calidad del Aire 2019**, elaborado por el INECC se menciona que, el Ozono troposférico rebasó la NOM de salud ambiental en Cuernavaca, Ocuituco y Zacatepec. En las tres ciudades se superaron los dos límites normados para protección de la salud (1 y 8 horas). La concentración más alta, como promedio de 1 hora, se registró en Ocuituco, y la concentración más alta como promedio de 8 horas se registró en Zacatepec. Dichas concentraciones fueron de 0.117 y 0.100 ppm, respectivamente (INECC, 2019).

En general, en 2019 se registraron 21 días con concentraciones superiores a alguno de los límites normados de este contaminante en Cuernavaca. Las concentraciones más altas de ozono en 2019 ocurrieron con mayor frecuencia en los meses de marzo a mayo en Cuernavaca. Como tendencia histórica se aprecia que en la ciudad de Cuernavaca se ha experimentado un incremento en el promedio y en los percentiles 25 y 75 en el periodo 2016 a 2019. A pesar de ello, el porcentaje de días y horas con concentraciones superiores al límite normado de 1 hora no ha experimentado cambios significativos en ese periodo de tiempo.

3.-MARCO TEÓRICO

3.1 ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN DE LA ATMÓSFERA

La atmósfera es una capa protectora que envuelve al planeta tierra y que permite que se generen las condiciones necesarias en la superficie terrestre para que pueda desarrollarse la vida. La composición natural de la atmósfera es del 78 % de Nitrógeno, 21 % de Oxígeno, 0.93 % de Argón, 0.0314 % de Dióxido de carbono, 0.0002% de Metano, 1 % de Vapor de agua y otros gases traza en pequeñas concentraciones, tales como el Neón, Helio, Kriptón, Hidrógeno y Xenón (Tan, 2014).

El comportamiento de la atmósfera es consecuencia de los gases que la conforman, los cuales pueden provenir por fuentes naturales como por fuentes antropogénicas, y por las fuerzas físicas que actúan sobre esta (Manahan, 2001).

En virtud de lo anterior, la atmósfera se encuentra dividida por varias capas en función de la temperatura y la densidad, a continuación, se describen brevemente cada una de ellas:

Troposfera: Es la capa que se encuentra desde la superficie terrestre hasta los 11 kilómetros de altura aproximadamente. También se caracteriza por tener una composición homogénea de los gases. La temperatura puede oscilar en promedio entre los 15°C a nivel del mar y hasta los -56°C en su límite superior denominado como tropopausa (Manahan, 2001) (Colin, 2014).

Estratosfera: Es la capa que se encuentra por encima de la troposfera a partir de los 11 kilómetros y hasta los 50 kilómetros de altura. También caracterizada porque la temperatura crece con la altitud. Es decir, la temperatura oscila en los -56°C en su nivel inferior junto a la tropopausa, y puede aumentar hasta los -2°C en su nivel superior por acción de la absorción de la energía solar ultravioleta por el ozono (Manahan, 2001) (Colin, 2014).

Mesosfera: Es la capa que se encuentra sobre la estratosfera a partir de los 50 kilómetros y hasta 85 kilómetros de altura. Esta capa es caracterizada por la ausencia de niveles altos de especies absorbentes de radiación electromagnética. Es decir, la concentración de los gases es muy baja y la temperatura disminuye en función de la altura (Colin, 2014). Asimismo,

las regiones superiores de la mesosfera se definen como Exosfera en la cual las moléculas y los iones pueden escapar hacia la termosfera (Manahan, 2001).

Termosfera o Ionosfera: Es la última capa externa de la atmósfera y se encuentra a partir de los 85 kilómetros de altura. Esta capa es caracterizada por gases (nitrógeno y oxígeno) que pueden alcanzar temperaturas de 1200 °C por la absorción de radiación electromagnética de longitudes menores a los 200 nanómetros (Manahan, 2001) (Colin, 2014).

3.1.2-OZONO EN LA ESTRATOSFERA

En la estratosfera, la capa de ozono filtra la radiación ultravioleta solar y se ve afectada por varios procesos fotoquímicos y dinámicos en la atmósfera. La formación de ozono estratosférico se produce principalmente en regiones tropicales y es la consecuencia de las reacciones entre el oxígeno atmosférico y la radiación solar ultravioleta (Sousa et al, 2020).

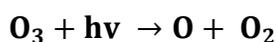
El incremento de la temperatura con la altitud en la estratosfera se debe principalmente a la absorción de radiación de luz ultravioleta (mayor energía y más frecuencia), con una longitud de onda de 200 a 310 nanómetros (nm), por parte del oxígeno molecular para disociarse en oxígeno atómico.



Posteriormente, el oxígeno atómico y el oxígeno molecular se asocian para formar ozono (O_3), y convertir la radiación en energía o calor.



Asimismo, el ozono formado absorbe nuevamente la radiación ultravioleta con una longitud de onda de 240 a 320 nm, y se descompone en un oxígeno atómico y oxígeno molecular.



Lo anterior con la finalidad de mantener el balance constante de las concentraciones de ozono y oxígeno por medio de la transformación de radiación UV a calor. Mejor conocido como el ciclo de Chapman.

3.2-NORMATIVIDAD Y GESTIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA URBANA

La contaminación atmosférica es definida como la introducción de sustancias ajenas a la atmósfera y formas de energía con alteraciones físicas, químicas y biológicas (Colin, 2014). La contaminación atmosférica se refiere a la presencia de gases y partículas que pueden ser nocivas para la población, derivadas de las actividades humanas, el transporte público y privado, generación de electricidad, actividades industriales, así como también de fuentes naturales (Thomas y Stigliani Spiro, 2004).

La Organización Mundial de la Salud (OMS), ha establecido límites permisibles de concentraciones atmosféricas de contaminantes de acuerdo con su toxicidad y el efecto en la salud de la población expuesta. Los contaminantes que cuentan con niveles máximos recomendables ya que afectan a las poblaciones, principalmente en las zonas urbanas por sus altas concentraciones durante el día, se denominan contaminantes criterio y se describen en la siguiente sección. Las autoridades en México han reglamentado las concentraciones ambientales a través de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), implementadas para establecer límites máximos permisibles de emisiones a la atmósfera para diferentes tipos de fuentes fijas y diferentes compuestos contaminantes.

Las Guías integrales sobre el monitoreo calidad del aire de la OMS constituyen un análisis consensuado y actualizado sobre los efectos de la contaminación en la salud, asimismo, recomiendan los parámetros para mejorar la calidad del aire y lograr la reducción de los riesgos a la salud.

México es una de las ciudades más contaminadas del mundo, debido a la cantidad de días al año en los cuales se superan las normas de salud (PROAIRE, 2012). Los contaminantes criterio que se han monitoreado en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM),

desde hace décadas han sido: Ozono (O_3), partículas suspendidas totales (PST), bióxido de nitrógeno (NO_2), bióxido de azufre (SO_2) y material particulado (PM_{10}) (PROAIRE, 2012 y SIMAT, 2016). Más recientemente se ha comenzado a monitorear también $PM_{2.5}$.

En México, el gobierno federal a través de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), es la encargada de establecer los Límites Máximos Permisibles (LMP) y los estándares sobre la calidad del aire para la protección de los ciudadanos, así como también, vigilar su cumplimiento normativo. Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), son de observancia obligatoria en todo el territorio nacional y describen los valores máximos permisibles para los contaminantes criterios (SIMAT, 2021). Las autoridades ambientales han definido el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA), para poder comparar los niveles de contaminación en las principales ciudades metropolitanas del país, y así evaluar la calidad atmosférica con la que cuentan. De esta forma se pueden establecer normas ambientales para la protección de la salud de las poblaciones en general, principalmente en zonas urbanas.

Cuando los niveles de contaminación del aire representan un riesgo para la salud de la población, se informa a las instancias responsables de la vigilancia y control para que, en el ámbito de su competencia, apliquen de manera inmediata las acciones necesarias para controlar y reducir las emisiones contaminantes (SIMAT, 2020).

El Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT), realiza el seguimiento en tiempo real de las concentraciones de los principales contaminantes atmosféricos en la Ciudad de México y la zona conurbada (SIMAT, 2020). Con base en análisis objetivos y/o en el monitoreo de la contaminación ambiental, se prevé o se presenta una concentración de contaminantes o un riesgo ecológico derivados de actividades humanas o fenómenos naturales que puedan afectar la salud de la población o al medio ambiente (SIMAT, 2020).

Si bien el SIMAT realiza el monitoreo de la calidad del aire, es la Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) la responsable de la activación y seguimiento al Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas. La CAME utiliza la información derivada del monitoreo atmosférico para dicha tarea (SIMAT, 2020). El

Programa para Prevenir y Responder a Contingencias Ambientales Atmosféricas reúne un conjunto de medidas que se aplican cuando se presenta un episodio de contaminación severa por ozono (O_3), partículas menores a 10 y 2.5 micrómetros (PM_{10} , $PM_{2.5}$), que pone en riesgo la salud de la población en general y principalmente de los grupos sensibles (SIMAT, 2020).

Actualmente, para el control y regulación de las emisiones contaminantes existen 14 NOM dirigidas a las fuentes fijas y nueve a las fuentes móviles; también hay una NOM para realizar el monitoreo de calidad del aire y una más para regular la calidad de los combustibles que se consumen a nivel nacional (PROAIRE, 2018-2027).

Durante el monitoreo de la calidad del aire se emplean dos tipos de Normas Oficiales Mexicanas: Las NOM'S de salud ambiental, la cual establece los límites máximos autorizados para los contaminantes criterio, y las NOM's técnicas que definen los métodos de medición que pueden ser de referencia o equivalentes recomendados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en inglés) de los contaminantes criterio a nivel nacional (SIMAT, 2021). Es por ello, que cuando no existe una NOM para algún contaminante criterio se debe utilizar la recomendación de la US EPA.

Las Normas Mexicanas (NMX), son regulaciones técnicas que establecen las especificaciones de la calidad de los procesos, productos, servicios, métodos de prueba, competencia, etcétera. Dichas normas han sido expedidas por la Secretaría de Economía y es de aplicación voluntaria a nivel nacional.

Aunado, a la normatividad ambiental antes mencionada, existen otras normas oficiales sobre calidad del aire. A continuación, se describen:

La NOM-156-SEMARNAT-2012; regula el establecimiento y la operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire. Y la segunda NOM-172-SEMARNAT-2019; establece los lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgo a la Salud y es de observancia general en el país para los gobiernos municipales y estatales.

Los programas gubernamentales elaborados para el mejoramiento de la calidad del aire de las zonas metropolitanas (PROAIRE), permiten conocer las principales fuentes de emisiones a la atmósfera y de esa forma generar un diagnóstico de la calidad del aire. De igual manera, establecen acciones para prevenir y controlar la contaminación atmosférica causada por el transporte, la industria, y los servicios e incluye acciones relativas a los desarrollos urbanos, rurales y ecológicos. Las estrategias que engloban estos programas han sido desarrolladas de manera conjunta por las autoridades de distintos ámbitos de gobierno.

El Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA), es un programa informativo que permite recabar, transmitir y publicar la información sobre la calidad del aire que se genera en las estaciones de monitoreo ubicadas en toda la república mexicana que cuentan con la infraestructura adecuada para el tipo de medición. La información proviene por parte de los Sistemas de Monitoreo de Calidad del Aire, SMCA, que son administradas por gobiernos municipales y estatales. Existen dos formas para poder consultar las mediciones ambientales registradas por las redes de monitoreo: Datos crudos de la calidad del aire y de variables meteorológicas en tiempo real y a través de los indicadores. En esta sección se incluyen la visualización y descarga de los datos históricos validados de la zona o región.

Los Sistemas de Monitoreo de la Calidad del Aire (SMCA), son considerado también como un conjunto de recursos técnicos y administrativos que operan una o un conjunto de estaciones de monitoreo y/o muestreo que miden la calidad del aire en una zona o región.

Las redes de muestreo y/o monitoreo, son redes de medición conformada por más de una estación de muestreo y/o monitoreo. Representan el conjunto de estaciones que miden la calidad del aire en una región específica.

Las estaciones de monitoreo están constituidas por uno o más instrumentos diseñados específicamente para medir de forma continua, la concentración ambiental de contaminante en aire ambiente, con el fin de evaluar la calidad del aire en un área determina.

Se consideran datos crudos, a aquellos datos que se generan en las redes de monitoreo de la calidad del aire y muestreos de contaminantes atmosféricos, que no han sido sometidos al procedimiento de validación.

La validación de datos es el proceso técnico por el cual se determina la calidad analítica de un conjunto de datos de acuerdo con las necesidades particulares de los Sistemas de Monitoreo de la Calidad del Aire y de su plan establecido para realizar el aseguramiento de la calidad de estos.

3.3- CLASIFICACIÓN DE LOS CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Los contaminantes atmosféricos, se pueden ser clasificar según su origen (natural o antropogénico), por su composición química orgánico e inorgánico), o por su estado de agregación al momento de ser emitido a la atmósfera (gas o líquido).

Los contaminantes primarios, son aquellas sustancias químicas que se emiten directamente a la atmósfera desde su fuente (fuente fija o móvil – fuente natural).

Los contaminantes secundarios son aquellas sustancias que no se emiten directamente a la atmósfera, sino que se producen por las reacciones químicas y reacciones fotoquímicas de los contaminantes criterios mediante la interacción con otras especies químicas en presencia de algunos parámetros meteorológicos durante el ciclo diurno y el ciclo nocturno. Por ejemplo, el ozono troposférico (O_3), se forma por la intervención de los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), en presencia de luz solar. Asimismo, la oxidación del SO_2 ocurre mediante la interacción con H_2O , y forma el SO_4 o H_2SO_4 (ácido sulfúrico). Así como también, las emisiones de NO_x , se oxidan al interactuar con una molécula de H_2O y forma ácido nítrico (HNO_3).

Sin embargo, también se pueden encontrar otros tipos de gases contaminantes en la atmósfera en cantidades menores que pueden llegar a variar de acuerdo con su ubicación geográfica o al tiempo atmosférico; como, por ejemplo: Ácido nitroso y otras especies químicas (Tan, 2014).

3.3.1-CONTAMINANTES CRITERIO

Los contaminantes criterio son aquellas sustancias que se emiten en grandes cantidades a la atmósfera y que representan un riesgo para la salud y el bienestar de los seres humanos (García-Reynoso et al, 2007). En México, los gases y partículas que se consideran como contaminantes criterios son el ozono, el monóxido de carbono, el dióxido de nitrógeno, el dióxido de azufre, las partículas iguales o menores a 10 y 2.5 micrómetros (PM_{10} y $PM_{2.5}$), el plomo. Asimismo, estos contaminantes se encuentran normados y cuentan con ciertos estándares que regulan su concentración en el aire ambiente (SIMAT, 2020).

La identificación de la tendencia de un contaminante criterio permite reconocer su evolución en el tiempo e inferir el impacto de las estrategias para su control, disminución y el cumplimiento de las NOM de Salud Ambiental (PROAIRE, 2018-2027).

Los contaminantes para los cuales la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que no se superen los niveles máximos permisibles son los siguientes:

1. Monóxido de carbono (CO): Es generado principalmente por la quema incompleta de combustibles fósiles, principalmente de fuentes móviles. En altas concentraciones es considerado letal, debido a que la hemoglobina presenta preferencia por el CO, sustituyendo el transporte de oxígeno hacia el cerebro (SIMAT, 2020). La Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993 establece el límite máximo permisible que tolera el cuerpo humano en: 11.0 ppm en promedio de 8 horas.

2. Dióxido de nitrógeno (NO_2): También se genera a partir de la quema de combustibles fósiles. La exposición a concentraciones elevadas puede ocasionar daño a las vías respiratorias, bronquitis y pulmonía (SIMAT, 2020). La Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993, establece el límite máximo que tolera el cuerpo humano en: $40\mu g/m^3$, media anual (0.021 ppm) y $200\mu g/m^3$, media de una hora.

3. Dióxido de azufre (SO_2): Se genera a partir de la combustión de combustibles fósiles con altas concentraciones de azufre, por ejemplo, el diésel. Es un gas incoloro y con un olor sofocante, que, en presencia de vapor de agua, puede generar ácido sulfúrico. En altas

concentraciones genera daño a las vías respiratorias y/o cardiovasculares (SIMAT, 2020). La Norma Oficial Mexicana NOM-O22-SSA1-2019, establece el límite máximo permisible para el cuerpo humano: 0.040 ppm como promedio máximo de 24 horas, y 0.075 ppm para el promedio aritmético de 3 años consecutivos de los percentiles 99 anuales como promedio horario.

4. Ozono (O_3): Es un gas que se encuentra de forma natural en la estratosfera, protegiendo a los seres vivos de los rayos UV. Sin embargo, el ozono troposférico se genera en áreas urbanas y a partir de gases primarios precursores (NO y COV), por procesos fotoquímicos (SIMAT, 2020). La Norma Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014, establece el límite máximo que tolera el cuerpo humano en: 0.070 ppm, media de ocho horas.

5. Material particulado: Es generado por la combustión incompleta de combustibles fósiles, la quema de biomasa, por erosión del suelo y en otros procesos industriales (ej. producción de cemento). Puede consistir en pequeñas partículas sólidas y líquidas que en dependencia de su tamaño se conocen como $PM_{2.5}$ y PM_{10} , siglas correspondientes a material particulado con tamaño aerodinámico menor que $2.5 \mu m$ y que $10 \mu m$, respectivamente. Sus efectos en la salud dependen de la concentración, el tamaño y la composición, generando enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Los efectos en la salud humana, por partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$, conducen a la inflamación del tejido de los pulmones, al incremento en la frecuencia de síntomas respiratorios como tos, dificultad para respirar, al incremento de las infecciones respiratorias y enfermedades del pulmón (DGPCCA, 2010 y SIMAT, 2020). La Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-1993, establece el límite máximo permisible que tolera el cuerpo humano es: Partículas menores a $10 \mu m$: $40 \mu g/m^3$, promedio anual; $75 \mu g/m^3$, promedio de 24 horas, partículas menores a $2.5 \mu m$: $12 \mu g/m^3$, promedio anual; $45 \mu g/m^3$, promedio de 24 horas. Con la finalidad de proteger la salud de la población, se decretó una nueva norma de calidad del aire para las partículas el 20 de agosto del 2014: la NOM-025-SSA1-2014, y los límites se redujeron a $45 \mu g/m^3$ y $75 \mu g/m^3$, respectivamente (De La Rosa et al., 2014).

En los últimos años se ha reconocido el daño que causan a la población las partículas atmosféricas cuya composición contiene carbón negro (también llamado hollín) asociadas

con la combustión incompleta de los combustibles fósiles (incluido el biodiesel), y con la quema de biomasa (Aida, 2013; De La Rosa et al, 2013). Las partículas de carbón negro varían de tamaño. Generalmente son mucho más pequeñas que las partículas de $2.5 \mu\text{m}$ y se incluyen dentro de la categoría de partículas ultrafinas o submicrométricas ($\leq 1 \mu\text{m}$) (DGPPCA, 2010 y SIMAT, 2016).

3.3.2 – CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS TÓXICOS

Son aquellos contaminantes que, se sabe que son o pueden ser cancerígenos, mutagénicos y neurotóxicos. Asimismo, no se cuenta con la medición de manera continua de las especies químicas. A continuación, se mencionan algunos de los contaminantes atmosféricos considerados como tóxicos:

1.-Formaldehído (HCHO): Es un gas contaminante dañino producto de la quema incompleta de combustibles fósiles, quema de biomasa y la oxidación fotoquímica de hidrocarburos de fuentes biogénicas. El formaldehído es un gas de vida corta y tiene una clara variabilidad estacional durante el año y es considerado un contaminante secundario. Asimismo, ha sido considerado como un indicador importante en la troposfera de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), provenientes de diversas fuentes naturales y antropogénicas. La principal fuente de HCHO en la atmósfera es la oxidación del metano (CH_4). Las variaciones estacionales e interanuales de la distribución de formaldehído están relacionadas principalmente con cambios de temperatura y eventos de incendios, así como también por actividades antrópicas.

2.- Compuestos Orgánicos Volátiles (COVs): Son gases que se evaporan al aire con facilidad producto del uso de disolventes, combustibles líquidos y otros compuestos orgánicos, aunado a los hidrocarburos no quemados y parcialmente quemados emitidos directamente por el tubo de escape del vehículo y por parte de las quemas de la combustión incompleta de combustibles fósiles. Asimismo, existen diversas fuentes antropogénicas y fuentes biogénicas y poseen temperaturas de ebullición entre 50 a $260 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.- Metano (CH_4): Es un gas contribuyente del efecto invernadero y es considerado de gran potencial para el calentamiento global. Se puede producir de manera natural, sin embargo,

sus concentraciones ambientales han aumentado por las actividades antropogénicas en la producción de energía y en el uso de gas natural. El metano se produce por medio de la fermentación bacteriana en condiciones anaerobias, también, mediante la descomposición de la materia orgánica, quema de biomasa, por emisiones naturales de los cultivos de arroz, humedales naturales, zonas pantanosas y por actividades ganaderas.

Actualmente no se cuenta con una norma oficial mexicana que establezca los límites máximos permisibles para estas sustancias tóxicas. Sin embargo, se tiene conocimiento de los efectos directos de riesgo sobre nuestra salud al estar en exposición a los compuestos orgánicos volátiles y tóxicos en diferentes lugares (casa – habitación, oficina, restaurantes, edificios, entre otros).

3.4-OZONO TROPOSFÉRICO

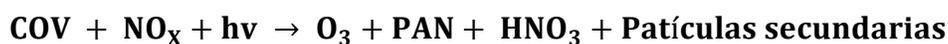
El ozono (O_3), es un gas que está presente en pequeñas concentraciones por toda la atmósfera, y es un gas azulado de olor picante, alótropo del oxígeno, poco denso y es considerado el gas oxidante más abundante. Dicho contaminante tiene mayor presencia en las grandes urbes, generando problemas respiratorios a la población entre otras afectaciones (INECC, 2000).

El ozono en la troposfera es formado por la interacción de los Óxidos de Nitrógeno (NO_x), Bióxido de Nitrógeno (NO_2), Compuestos Orgánicos Volátiles (COV's), Monóxido de Carbono (CO), en presencia de luz solar y también es transportado desde la estratosfera, no es emitido directamente por ninguna fuente (Moeini et al, 2020).

El ozono troposférico también es considerado como un gas de efecto invernadero (Homero y Gasca, 2007), toda vez que absorbe parte de la radiación infrarroja que emite la superficie terrestre, provocando el aumento de la temperatura media del planeta, así como también, efectos en el clima. Con el calentamiento global se genera un círculo vicioso, ya que el aumento de temperatura lleva aparejado un aumento de las reacciones químicas y por tanto favorecerá el mecanismo de formación de foto-oxidantes. Asimismo, la temperatura influye en la evaporación de los hidrocarburos y otros compuestos orgánicos volátiles (COV's), que como ya se ha mencionado, son precursores del ozono (Jaimes, 2017).

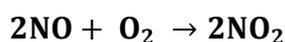
El ozono como contaminante secundario, se forma por la reacción química entre los óxidos de nitrógeno (**NO_x**) y los compuestos orgánicos volátiles (**COV**), en presencia de luz solar, sin embargo, ambos precursores compiten y, dependiendo cuál de los dos domine más, el ozono se incrementará o disminuirá. Esto puede explicarse debido a que su proceso fotoquímico de formación es complejo y no es de manera lineal, (Galán y Fernández, 2006; Baird y Cann, 2014; Jaimes, 2017; Peralta et al, 2020).

De igual manera, la concentración máxima de ozono que se puede acumular en la troposfera contaminada dependerá de ciertos factores no solamente de las concentraciones de sus gases precursores, sino también de la relación entre sí [COV/NO_x]. Por ejemplo, las acciones para disminuir las emisiones de NO_x reducirá la concentración de ozono en áreas limitadas por los NO_x, pero, aumentará el nivel ambiental de ozono en áreas limitadas por los COV. Por el contrario, las estrategias para reducir las emisiones de COV disminuirán la concentración de ozono en regiones limitadas por COV, pero aumentará el ozono en regiones limitadas por los NO_x.

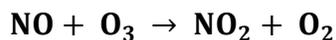


La fuente principal de los óxidos de nitrógeno son las actividades antrópicas, especialmente las emisiones por combustión incompleta de combustibles fósiles. El dióxido de nitrógeno es la única fuente troposférica significativa de oxígeno atómico a partir del cual se forma ozono.

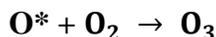
Los compuestos nitrogenados en la atmósfera sufren diversas y complejas transformaciones químicas y físicas, que contribuyen a la formación de ozono troposférico a nivel de superficie, así como también, formación de lluvia ácida y su deposición ácida, y la formación de material particulado secundaria por medio de la interacción de gas/partícula. A continuación, se muestra el proceso de oxidación del monóxido de nitrógeno en la atmósfera por acción del oxígeno molecular:



La tasa de conversión de NO_2 , es rápida, pero si los niveles de NO son bajos la tasa de disminuye considerablemente. Bajo condiciones troposféricas específicas la siguiente reacción es la fuente principal para la generación de dióxido de nitrógeno:



En la fase del ciclo diurno, el NO_2 sufre un proceso de reconversión a NO , como resultado del proceso de fotólisis, generando así ozono troposférico a nivel de superficie:

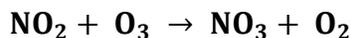


Donde O^* se encuentra en estado excitado (mayor energía y más inestabilidad), por lo que generará una segunda reacción química rápidamente. Por otra parte, los sustancias productos que se forman son consideradas reactivas y generan más reacciones y otros contaminantes secundarios, y también pueden volver a regenerarse. Por ejemplo, el smog fotoquímico, se forma por la mezcla de contaminantes primarios y contaminantes secundarios en presencia de luz solar. Hoy en día es más frecuente observar la presencia de este tipo de contaminación atmosférica en las grandes ciudades o zonas metropolitanas debido a las actividades antropogénicas.

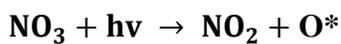
La mayoría de los procesos oxidativos son iniciados en el día con la presencia de luz solar. El proceso de formación de oxidantes atmosféricos es muy complejo, y puede realizarse por etapas mediante una serie de reacciones químicas. La contaminación fotoquímica se produce cuando existen especies contaminantes muy reactivas en la atmósfera y estas interactúan con la radiación solar. Algunas especies químicas poseen una mayor capacidad para reaccionar que otras especies químicas. La formación de oxidantes en la atmósfera se ve favorecida debido a la estabilidad atmosférica que se presenta por los sistemas de alta presión asociados con una fuerte insolación, poca nubosidad, vientos muy débiles o barreras geográficas que impiden la dispersión y mezcla de los contaminantes criterio de manera horizontal o vertical en la atmósfera.

Sin embargo, durante la noche, la química atmosférica de los óxidos de nitrógeno genera procesos oxidativos significativamente potenciales que pueden generar ozono troposférico, pero también generan otra serie de contaminantes secundarios.

En el ciclo diurno, el NO_2 es lentamente convertido a Nitrato (NO_3), por la reacción con el ozono troposférico:



Asimismo, el NO_3 es fotolizado en poco tiempo, permitiendo la regeneración del O_2 y O_3 en el ciclo diurno.



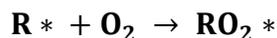
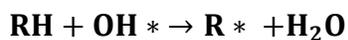
Otra reacción que puede ocurrir es que el NO_3 reacciona rápidamente con NO , permitiendo la regeneración de NO_2 .

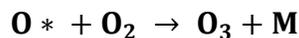
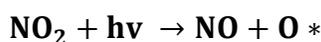
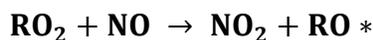


En la fase del ciclo diurno, el NO_3 se encuentra muy limitada, porque al interactuar con la luz solar con longitudes de onda menores a 640 nm se fotodisocia, y es por ello, que su concentración no es muy significativa. Sin embargo, la química nocturna para los derivados de los óxidos de nitrógeno (NO_x y NO_3), difieren significativamente de la química diurna.

El dióxido de nitrógeno generado durante la fase nocturna no es capaz de fotodisociarse por la ausencia de luz solar ni mucho menos de reaccionar con el ozono por encontrarse en concentraciones menores. Por lo tanto, el NO_2 puede reaccionar únicamente con el NO_3 en la fase nocturna para formar otros contaminantes secundarios en la atmósfera.

Existe un camino de reacción que convierte el monóxido de nitrógeno (NO) a dióxido de nitrógeno (NO_2), sin consumir ozono (O_3) permitiendo así su acumulación en la troposfera. Este proceso se favorece por la presencia de hidrocarburos, que reaccionan con un radical hidroxilo (OH) y con oxígeno atmosférico para generar un Radical Orgánico Peróxido (RO_2), dicho radical oxida al NO a NO_2 :





Cabe resaltar, que la química atmosférica presenta una clara variación durante la fase diurna y la fase nocturna, es decir, con base en la presencia de luz solar o en ausencia de esta. Una de las diferencias más importantes entre la química diurna y la química nocturna es la formación de ozono troposférico siendo nocivo para los seres humanos y los ecosistemas.

Por todo lo anteriormente, se concluye que la química atmosférica del ozono troposférico y los óxidos de nitrógeno es compleja y dependen de la presencia con otros contaminantes atmosféricos, así como de variables meteorológicas.

3.5-TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE CONTAMINANTES CRITERIO

Las estaciones de monitoreo del SINAICA, cuentan con analizadores automáticos, monitores de partículas, sensores meteorológicos, sistemas para la calibración y sistemas de adquisición de los datos. En México, Los principios de operación de los equipos de monitoreo deben de cumplir con los métodos de referencia o equivalentes establecidos en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM'S). En caso de no hacerlo, deberán apearse a los métodos equivalentes establecidos por la Agencia de Protección Ambiental (EPA US, por sus siglas en inglés). Lo anterior, con base en el Manual 3. Redes, Estaciones y Equipos de Medición de la Calidad del Aire. A continuación, se describen brevemente:

3.6-EQUIPOS DE MEDICIÓN

Método equivalente de fotometría ultravioleta (UV) para analizar O₃:

El analizador fotométrico UV modelo T400, utiliza el método de la Ley Beer-Lambert el cual consiste en medir la cantidad de luz ultravioleta a una longitud de onda de 254 nanómetros absorbida por el ozono presente en una muestra de aire para calcular la concentración de este gas. (INECC, 2005).



Figura 1. Equipo O₃ Analyzer – Model T400.

Método equivalente de fotometría infrarroja (IR) para analizar CO:

El analizador de fotometría IR modelo T300, se basa en la Ley de Beer-Lambert, la cual consiste en la capacidad que tiene el gas para absorber energía a ciertas longitudes de onda. Es decir, se mide la cantidad de absorción de luz infrarroja de las moléculas de CO que contiene una muestra. Asimismo, se hace pasar el haz de luz por un filtro que contiene dos celdas, en una de ellas hay CO en alta concentración, y en la otra hay N₂. Posteriormente, el detector mide la diferencia energía entre la radiación absorbida por la muestra y la señal modulada entre los gases del filtro (INECC, 2005).



Figura 2. Equipo CO Analyzer - Model T300.

Método equivalente de Cambio de Fase Atenuado por Cavidad (CAPS) para analizar NO₂:

El analizador CAPS Modelo T500U, se basa en la Ley de Beer - Lambert, la cual consiste en medir directamente la concentración de NO₂ en el aire ambiente por absorción óptica. Es decir, se mide la luz de un diodo emisor de luz (LED) UV en el rango de 450 nm,



Figura 3. Equipo NO₂ Analyzer – Model T500U.

Método equivalente de Fluorescencia para analizar SO₂:

El analizador de fluorescencia Modelo T100, se basa en el hecho de que las moléculas de SO₂ absorben radiación (UV) en el rango de longitud de onda entre 210-410 nanómetros, ocasionando que las moléculas entren a un estado de excitación instantáneo para posteriormente disminuir su estado de energía a nivel inferior, pero emitiendo un pulso de luz fluorescente. La intensidad de la luz fluorescente es proporcional a la concentración de SO₂ (INECC, 2005).



Figura 4. Equipo SO₂ Analyzer – Model T100.

En México para la medición de PM₁₀ y PM_{2.5}, se utiliza el método equivalente para atenuación de radiación beta, el método de microbalanza oscilatoria y el muestreador de partículas suspendidas. Cabe mencionar que, no existen métodos de referencia en el país para esos contaminantes. Sin embargo, estos no realizan el análisis de la muestra, sino únicamente cuantifican la concentración del material particulado con base en sus propiedades físicas (INECC, 2005).

El proceso consiste en aprovechar la dinámica de las partículas para que, a cierta velocidad de flujo, las partículas de mayor tamaño sean impactadas en el sistema de retención y no lleguen hasta el filtro (INECC, 2005).

Microbalanza oscilatoria:

La tecnología de este método permite hacer determinaciones de masa muy confiables, toda vez que cuenta con mayor precisión que la microbalanza convencional. Este muestreador, mide la cantidad de masa recolectada en una muestra de aire a velocidad constante. Después, la cantidad de masa recolectada se calcula a partir del cambio en la frecuencia del elemento en un periodo de tiempo fijo. Así como también, se determina la concentración de partículas en la masa recolectada, y la tasa de flujo de la muestra, y el tiempo de recolección de muestra (INECC, 2005).

Atenuación de radiación beta:

Se toma una muestra de aire y se introduce al sistema mediante una bomba de succión, permitiendo que se depositen las partículas en un filtro (una cinta de fibra de vidrio) de manera intermitente. Posteriormente, se hace pasar radiación beta de bajo nivel a través de la cinta y las partículas depositadas. Y la capa de partículas, reduce la intensidad la intensidad del haz de radiación beta, la cual es medida por la cámara de ionización como detector. La concentración se calcula a partir del aumento temporal de masa de partículas (INECC, 2005).



Figura 5. Equipos de medición de PM_{10} y $PM_{2.5}$ BAM 1020.

Muestreador de partículas suspendidas:

El método de referencia permite determinar la concentración de partículas en el aire ambiente por medio del muestreo de alto volumen, en conjunto con el método gravimétrico de laboratorio. Por medio de este método, también es posible cuantificar la concentración de otros elementos como: metales pesados, nitratos, sulfatos, etcétera (INECC, 2005).

Asimismo, este proceso consiste en hacer pasar la muestra de aire a una tasa de flujo de 1 metro cúbico por minutos a través de un filtro de fibra de vidrio bajo una cubierta protectora que evita que se deposite material directamente sobre el filtro. El muestreo se lleva a cabo de manera continua durante 24 horas, y el filtro sin muestra debe ser acondicionado a las mismas condiciones de temperatura y humedad a la que se acondicionará ya con la muestra (INECC, 2005).

El peso de la muestra se obtiene de la diferencia de pesos del filtro con muestra y del filtro sin muestra. Por otra parte, la concentración de partículas suspendidas totales (PST), en el aire ambiente se calcula dividiendo la masa de las partículas recolectadas entre el volumen total de aire muestreado (INECC, 2005).

3.7-TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE PARÁMETROS METEOROLÓGICOS

3.7.1-SENSORES METEOROLÓGICOS:

Velocidad del viento: La medición de la velocidad del viento es medida por anemómetros, que son ensambles de copas que giran sobre un eje vertical, así como de propelas que giran sobre un eje horizontal. En cualquiera de estos tipos de anemómetros, la rapidez de rotación es medida por un traductor de señal (INECC, 2005).



Figura 6. Sensor de velocidad del viento. Fuente: Manual 3. Redes, Estaciones y Equipos de Medición de la Calidad del Aire, INECC.

Dirección del viento: Los sensores de medición del viento brindan información acerca del ángulo del origen de la dirección del viento. El instrumento de medición está conformado por una aleta ensamblada verticalmente en la parte trasera del censo. El movimiento del viento aplica una fuerza, y el potenciómetro envía un voltaje proporcional a la dirección del viento.



Figura 7. Sensor de dirección del viento. Fuente: Manual 3. Redes, Estaciones y Equipos de Medición de la Calidad del Aire, INECC.

Temperatura: Los instrumentos para medir la temperatura ambiente son lo que cuentan con sensores de platino, los cuales son más resistentes a los cambios en la temperatura. Asimismo, deben de contar con protección contra la radiación solar y la velocidad del viento (INECC, 2005).



Figura 8. Sensor de medición de temperatura (Resistance Temperature Detectors). Fuente: Manual 3. Redes, Estaciones y Equipos de Medición de la Calidad del Aire, INECC.

Humedad relativa: Para la humedad relativa se utilizan los higrómetros eléctricos. Los cuales poseen una delgada película higroscópica, cuya resistencia y capacitancia son afectadas por la presencia de humedad en el aire ambiente (INECC, 2005).



Figura 9. Sensor de medición de humedad relativa. Imagen tomada de internet. <https://www.fisiorespiracion.es/> . Fecha de consulta: 03 de septiembre de 2022.

3.8.-EFECTO DE FIN DE SEMANA (EFS)

El Efecto de Fin de Semana (EFS), es un fenómeno que se presentarse en algunas zonas urbanas, y su principal característica es el aumento de la concentración del ozono (O_3) a nivel de superficie (Parra, 2017). Durante los fines de semana, las emisiones de contaminantes antropogénicos y especialmente los precursores (NO_x y COV) del O_3 , suelen ser inferiores a las realizadas entre semana, debido a la menor actividad humana e industrial (existe una disminución del tráfico rodado y desciende claramente la actividad empresarial).

Es decir, la relación emisión-concentración en lugares urbanos, suburbanos y rurales no está del todo clara e impide generar estrategias eficaces para reducir la mala calidad del aire.

3.9.-ISOPLETAS: HERRAMIENTAS UTILIZADAS PARA LA GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

La complejidad de la formación de ozono troposférico va más allá de los mecanismos químicos que lo generan. Por este motivo se ha logrado evidenciar que el incremento o la disminución de su concentración varían con respecto a las variables meteorológicas de la zona y la concentración de sus precursores. Tomando este último aspecto en cuenta, es intuitivo suponer que a mayores concentraciones de precursores (COVs y NO_x), las concentraciones de ozono incrementarían tentativamente. Sin embargo, se ha constatado que esto no se cumple y que la concentración de ozono tiene una dependencia no lineal respecto de la proporción en la que sus precursores se encuentran en el aire ambiente.

Una isopleta es una representación tridimensional de ozono en la cual su concentración se expresa en función de las concentraciones de NO_x y COVs. El modelo de calidad del aire tiene en cuenta los valores de los precursores (que varían en un determinado rango), y las condiciones de la simulación generando una representación de los valores de ozono.

El Régimen limitado por los óxidos de nitrógeno, presenta las siguientes características:

- Es el área donde la concentración de ozono depende de la cantidad de NO_x.
- Hay un déficit de óxidos de nitrógeno en la atmósfera, es decir, los NO_x son el factor limitante.
- Las concentraciones de COVs suelen ser altas, generalmente como consecuencia de la abundante presencia de la vegetación.
- El control de las emisiones de NO_x son esenciales para reducir las concentraciones de ozono a nivel de superficie.
- Una modificación en los niveles ambientales de COVs en la región limitada por NO_x haría variar los niveles de ozono de manera poco significativa, mientras que una reducción de los óxidos de nitrógeno conllevaría un sustancial descenso en los niveles de O₃.

El régimen limitado por los Compuestos Orgánicos Volátiles presenta las siguientes características:

- Es la región donde las concentraciones ambientales de ozono dependen de la cantidad de COVs presentes en la atmósfera.
- En esta región, las políticas de reducción de ozono irían encaminadas al control de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles.
- Esta zona un cambio en la concentración de NO_x no afecta a los niveles de ozono. Pero un aumento en las concentraciones de COVs, aumentaría las concentraciones del ozono troposférico por su rápida reacción con los radicales libres.

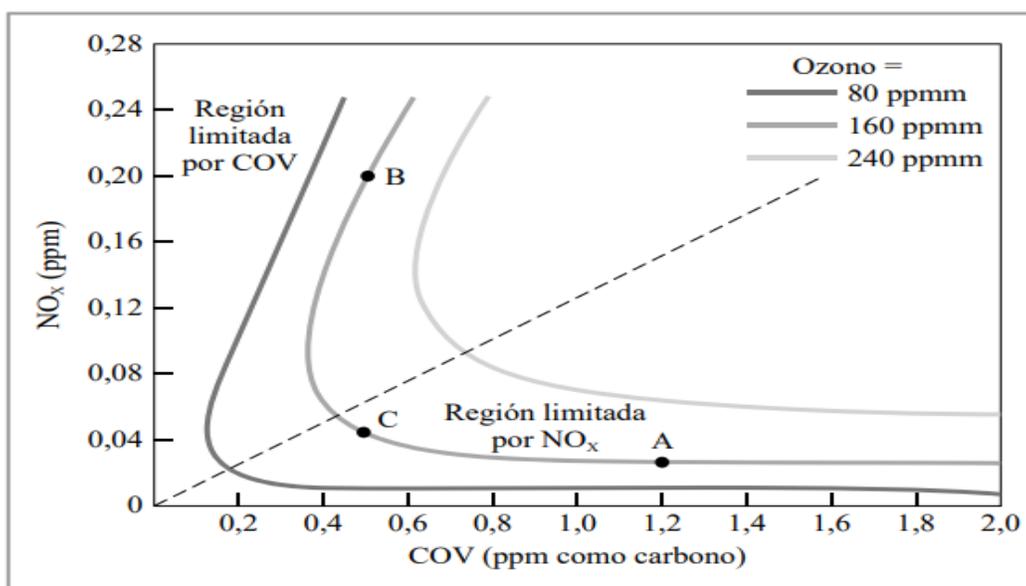


Figura 10. Representación esquemática (isopleta) de la relación de las concentraciones de NO_x y COV presentes en la atmósfera y las posibles concentraciones resultantes de la reducción de ozono por su reacción química (Colin, 2014).

3.10.-TELEDETECCIÓN: MEDICIONES SATELITALES

La teledetección es una técnica que nos permite detectar y caracterizar los objetos terrestres a gran distancia, es decir, la teledetección es el proceso mediante el cual se obtiene información sobre un objeto sin estar contacto físico directo con el objeto (Pérez et al 2020). Para ello se necesita un sensor capaz de registrar en imágenes la radiación electromagnética que proviene de la superficie de la Tierra y los objetos que hay sobre ella (por ejemplo, vegetación, masas de aire, océanos, edificios, incendios entre otros).

La teledetección también incluye todo el trabajo realizado a posteriori con esas imágenes, es decir su procesamiento, análisis técnico e interpretación. Cuando el sensor va a bordo de un satélite se denomina teledetección espacial.

Las ventajas que aporta la teledetección espacial frente a los métodos tradicionales, como el trabajo de campo o la interpretación visual de fotografías aéreas, son las siguientes:

- Permite la monitorización global de la tierra, es decir, permite realizar estudios a nivel regional.
- Permite realizar estudios multitemporales con mayor periodicidad.
- Es una técnica multidisciplinaria.

El sol proporciona una fuente de energía adecuada para la teledetección, los sensores que utilizan la energía del sol se llaman “**sensores pasivos**”. Estos sensores necesitan una fuente de iluminación y posteriormente registran la energía del sol reflejada por la superficie de la tierra, y/o la energía que emiten los propios objetos terrestres (energía térmica), que puede ser detectada también por la noche.

Por otra parte, también existen los “**sensores activos**”, los cuales emiten ellos mismos la radiación electromagnética que se refleja en los objetos y miden la energía que se devuelven reflejada al sensor (proceso de escaneo de la superficie terrestre). En la teledetección activa los sensores que trabajan en estas frecuencias emiten su propia radiación, la cual capturan después y evalúan los cambios entre el pulso emitido y el

reflejado. Al no depender de una fuente externa de iluminación, estos sensores pueden trabajar tanto de día como noche.

Cuando la radiación procedente del sol incide en las distintas cubiertas terrestres, puede ser reflejada (R), transmitida (T), absorbida (A) o dispersada (D). La superficie de la Tierra está formada por un conjunto heterogéneo de cubiertas con un comportamiento espectral distinto. Cada material, cada sustancia o cada ser vivo reflejan y emiten energía electromagnética de forma distinta, y por tanto cada uno tendrá una firma espectral característica que lo identifica.

La firma espectral de un objeto es capaz de resaltar las propiedades ópticas de los objetos, muchas veces procesos de interacción con la energía solar o asociadas a la composición de sustancias químicas (Pérez et al, 2020).

Los satélites de observación de la Tierra se pueden clasificar en función del tipo de órbita que describen. Los sensores, por la resolución espacial, y las bandas espectrales.

Cada vez que el satélite completa una vuelta se escanea una nueva franja de la superficie de la Tierra y, pasado un cierto número de vueltas, se habrá obtenido toda la superficie de la Tierra en pocas horas (por ejemplo, OMI o MODIS). Algunos satélites escanean una franja ancha (2600 km) cada vez y pueden de este modo cubrir la totalidad de la superficie de la Tierra en unas pocas vueltas. Por otra parte, los satélites de alta resolución que escanean sólo franjas estrechas (50 a 705 km) tardan varios días en completar la cobertura de la Tierra.

Una imagen satelital está formada por elementos individuales, llamados celdas o píxeles dispuestos en filas y columnas. Cada celda representa un área en la superficie de la tierra y tiene un valor único y el tamaño de las cuadrículas determina la resolución espacial, con la cual se puede contar con una mayor información ambiental de la zona estudiada o identificar las fuentes principales. La cantidad de moléculas por centímetros cuadrado, indica la densidad del contaminante atmosférico presente en una columna que va desde la superficie de la tierra hasta el límite superior de la troposfera (la columna de aire).

TROPOMI tiene una mayor resolución espacial de 5.5 x 3.5 km, mientras que Ozone Monitoring Instrument (OMI), tiene una resolución espacial de 13 x 24 km. Ambos recopilan información de los principales contaminantes atmosféricos y su distribución vertical una columna troposférica, para conocer la densidad de moléculas por cm^2 de cada especie química.

La evaluación de las mediciones satelitales nos proporciona la información necesaria sobre los posibles cambios espaciales y temporales de los principales contaminantes atmosféricos, asimismo, nos permite conocer la concentración y su distribución vertical a través de la medición de una columna con respecto a las mediciones obtenidas en la superficie terrestre.

La observación de la Tierra ya sea a partir de satélites y mediante sensores in-situ, proporciona información precisa y confiable sobre el estado de la atmósfera, océanos, costas, ríos, suelos, cultivos, bosques, ecosistemas, recursos naturales, incendios forestales, inundaciones, vertidos de petróleo, terremotos, hielo, nieve, construcciones e infraestructuras, etc. Son algunas de las aplicaciones en las que se requieren imágenes con alta frecuencia temporal en el periodo de tiempo que se están produciendo el fenómeno y su cambio con el paso del tiempo.

Las mediciones satelitales y las mediciones terrestres combinadas con la estadística y los censos demográficos permiten analizar y modelar diferentes objetivos, crear mapas y otras visualizaciones útiles, para evaluar el impacto a través de sectores y regiones, así como monitorizar el cambio en el tiempo de una manera estandarizada y diseñar estrategias y medidas de adaptación y resiliencia para el clima y la sostenibilidad. Es decir, que muchas veces la teledetección funciona como apoyo para conseguir mejores resultados.

El programa Copernicus ofrece productos sobre la composición de la atmósfera para el estudio de la calidad del aire, radiación solar, ozono y rayos ultravioletas estratosféricos, emisiones y flujos superficiales, y climatología forzada. La web del servicio es: <https://atmosphere.copernicus.eu/>

3.11.-ZONA DE ESTUDIO – ESTADO DE MORELOS

El estado de Morelos está localizado en la parte central de la República Mexicana, en la zona de transición entre la región Neártica y la región Neotropical, en la vertiente del sur de la sierra de Chichinautzin y dentro de la cuenca del Río Balsas. Ubicado geográficamente entre los paralelos 18°20'02" y 19°07'51" de latitud norte y los meridianos 99°37'08" y 99°30'21" de longitud oeste respecto al meridiano de Greenwich.

De acuerdo con el anuario estadístico el estado de Morelos tiene una extensión territorial de 4,961 km² y representan el 0.2 % de la superficie total del país. Colinda al Norte con la Ciudad de México y el Estado de México, al Sur con el Estado de Guerrero, al Este con el Estado de Puebla, y al Oeste con el Estado de México y Guerrero.

El relieve del estado de presenta diversas altitudes que van desde los 3,000 metros sobre el nivel de mar (msnm), en las sierras del lado Norte, y hasta los 850 msnm en la zona Sur en el municipio de Tlaquiltenango.

Morelos, se caracteriza por presentar una gran variedad de climas, la región cuenta con 6 diferentes tipos y subtipos de clima. De acuerdo con el mapa de climas de Köppen, modificado por García (1987), se presenta un clima templado con lluvias en verano (Cw) en la región Norte (Cuernavaca), mientras que el resto del estado presenta climas cálidos con lluvias en verano (Aw). A su vez, García (1988), describe que gran parte de Morelos (zona centro y sur) presenta un clima cálido subhúmedo (Aw0), y en la zona norte el clima varía desde semicálido con lluvias en verano, templado, semifrío y muy frío en las partes elevadas del volcán Popocatepetl.

Con base en el Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI, 2021), el estado de Morelos se tiene 36 municipios. A su vez, Morelos tiene una población total de 1, 917, 520 habitantes, de acuerdo con el último censo poblacional del año 2020 por parte del Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI). El municipio de Cuernavaca es la ciudad con mayor densidad poblacional del estado de Morelos, con un total de 378, 426 habitantes. (INEGI, 2021).

Morelos forma parte de la concentración urbana más grande del país denominado “**Megalópolis**”, que hace referencia a los estados que conforman la región centro del país, y en ella se encuentra la Ciudad de México, el estado de México, y los estados de Hidalgo, Morelos, Querétaro, Puebla y Tlaxcala. Dicha región, se caracteriza por presentar una problemática importante en materia de calidad del aire causada, principalmente por las emisiones generadas durante el desarrollo de las actividades antropogénicas, así como también de forma natural. De acuerdo con cifras oficiales por parte del INEGI, en el estado de Morelos hay un parque vehicular de 905,051 vehículos automotores registrados circulando (INEGI, 2021). Fuente: <https://www.inegi.org.mx/>.



Figura 11. Municipio de Cuernavaca, Morelos. Fuente: Elaboración propia con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2022).

3.12-GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN MORELOS

Actualmente el Estado de Morelos cuenta con cuatro estaciones de monitoreo atmosférico ubicadas en los municipios de Cuernavaca, Cuautla, Zacatepec y Ocuilco, para las mediciones de los niveles ambientales de ozono, monóxido de carbono, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, dióxido de nitrógeno, monóxido de nitrógeno, PM₁₀ y PM_{2.5}, presentes en la atmósfera (SDS, 2020) (SINAICA, 2021); y por diferentes cuestiones, actualmente, se encuentra operando de manera continua solo la estación del municipio de Cuernavaca, lo que impide una evaluación satisfactoria de la calidad del aire en el Estado. Sin embargo, esto se podría mejorar con un análisis a fondo de los factores que favorecen la emisión y formación de contaminantes que pueden deteriorar la calidad del aire.

Es decir, en la ciudad de Cuernavaca, Morelos únicamente cuenta con una estación de monitoreo por parte del Sistema de Monitoreo de Calidad del Aire (SMCA), a cargo de la Secretaría de Desarrollo Sustentable (SDS), y no se cuenta con alguna otra estación de monitoreo que opere de manera continua que permita evaluar la calidad del aire en diferentes puntos estratégicos del municipio (Ver figura 11). Asimismo, de acuerdo con los últimos análisis técnicos realizados por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INEEC), en la ciudad de Cuernavaca no se cumple con la Norma Oficial Mexicana (NOM), para el ozono; toda vez que durante el año, se rebasan los límites máximos permisibles establecidos para dicho contaminante criterio, derivado, principalmente por las diversas emisiones de sus precursores por el desarrollo de las actividades antrópicas (Servicio de transporte y actividades industriales).

La problemática antes mencionada, permite buscar otro tipo de herramientas de gestión ambiental para el monitoreo de la calidad del aire, por ejemplo, actualmente, el ozono es monitoreado desde el espacio por diversos equipos de monitoreo satelital al igual que otros contaminantes atmosféricos, tales como, el monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, formaldehído, metano, dióxido de azufre y los aerosoles atmosféricos de manera global.

Debido a que, las mediciones satelitales proporcionan mayor cobertura global y durante todo el año calendario, lo que permite contar con información rigurosa y confiable, para

identificar las concentraciones de diversos contaminantes y poder evaluar sus efectos a corto, mediano y largo plazo, así como también conocer sus posibles fuentes de origen e inclusive, dichas mediciones permiten conocer y evaluar las concentraciones de diversos contaminantes en zonas donde no se lleva a cabo la instalación de estaciones de monitoreo, tales como zonas suburbanas, zonas rurales, zonas forestales y en rutas oceánicas

A su vez, las autoridades estatales, han elaborado diversos estudios y programas técnicos en materia de calidad del aire con la finalidad de mejorar el control de las emisiones de precursores y disminuir la ocurrencia de episodios que superen la normatividad vigente a nivel estatal. Por ejemplo, se tiene registro que el primer Inventario de Emisiones (IE) de contaminantes a la atmosfera, se elaboró en el año base 2005, y fue el instrumento base para la elaboración del PROAIRE de la ZMC 2009-2012. Por su parte, el Inventario de Emisiones a la Atmósfera de Contaminantes en el Estado de Morelos, es considerado como una de las herramientas de gestión ambiental que permiten identificar las principales fuentes de emisión, su distribución temporal, las cantidades y el lugar en donde se generan, y así también poder definir y establecer acciones en favor del ambiente para controlar y reducir las emisiones a la atmósfera, con la finalidad de mejorar la calidad del aire de la entidad y proteger la salud de la población (Inventario de Emisiones a la Atmósfera de Contaminantes en el Estado de Morelos, 2014). Asimismo, su contenido y nivel de cobertura espacial es considerado como un elemento de diagnóstico fundamental para dar soporte y certeza a las medidas y acciones que se establecen en el presente PROAIRE 2018 – 2027.

El Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en Morelos (PROAIRE MORELOS, 2018 – 2027), tuvo como objetivo describir aquellos factores ambientales, sociales, económicos y de movilidad urbana que repercuten en la calidad del aire en el estado. También integra la información referente a la normatividad en materia de calidad del aire y menciona a todas aquellas instituciones que colaboran en la gestión ambiental a nivel municipal, estatal y federal. Por último, presenta el diagnóstico de la situación actual e histórica del Sistema de Monitoreo de Calidad del Aire (SMCA), y los resultados

aparentemente indican, que los precursores provienen esencialmente de emisiones del parque vehicular en la zona de Cuernavaca.

De igual manera, el Programa para mejorar la calidad del aire (PROAIRE, 2009 - 2012) en la Zona Metropolitana de Cuernavaca (ZMC, y el Programa de Gestión para Mejorar la Calidad del Aire en Morelos (PROAIRE MORELOS, 2018 – 2027), indican que no hay registros históricos continuos de la calidad del aire.

4.-PLANTEAMIENTO Y JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

¿Qué motiva estudiar y conocer el régimen de formación química del ozono troposférico durante la pandemia?

El ozono troposférico (O_3), es un contaminante criterio del aire y es considerado nocivo para la salud de los seres humanos, los ecosistemas y para el desarrollo y el rendimiento de los cultivos agrícolas. En ese sentido, se han diseñado diversas estrategias ambientales con la finalidad de reducir los niveles de ozono, sin embargo, la estrategia de control más común y poco efectiva ha sido la reducción de las emisiones de hidrocarburos, esto ocasiona un aumento en la concentración de ozono. Por ejemplo, recientemente se ha estudiado el efecto de este gas secundario en el periodo de pandemia, en el cual se han reportado aumentos en diferentes ciudades del mundo en comparación con años anteriores, esto se debe principalmente, a la disminución de emisiones de NO_x por la reducción de actividades vehiculares y comerciales, debido a que sus precursores compiten y dependiendo de cuál de los dos domine más, el ozono se incrementará o disminuirá.

Aunado a lo anterior, con base en la revisión de diversas fuentes bibliográficas, no se encontró algún estudio similar para el área de estudio que identifique el régimen de sensibilidad de formación fotoquímica de ozono troposférico a través del efecto de fin de semana, de igual manera, no hay información al respecto sobre el efecto que tuvo la pandemia en los niveles ambientales de los contaminantes atmosféricos por medio de las mediciones satelitales generadas por el satélite Sentinel-5P. Por lo que, este evento atípico es una oportunidad única para mejorar el conocimiento, entender el comportamiento de la contaminación por ozono y analizar los límites a los cuales se deben de reducir las emisiones de sus precursores para mejorar la calidad del aire.

La investigación permitirá crear los elementos técnicos y científicos que contribuyan en la toma de decisiones de las autoridades gubernamentales para establecer políticas públicas en materia de gestión de la calidad del aire o en su caso, establecer medidas de prevención durante las posibles contingencias ambientales que pudieran suscitarse en la región.

5.- HIPÓTESIS

En el periodo de contingencia sanitaria por el COVID-19, la concentración atmosférica y el régimen de formación fotoquímica de ozono troposférico en la ciudad de Cuernavaca, Morelos, podrían ser afectados como consecuencia de los cambios en las emisiones de los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), a causa de las restricciones en la movilidad y en las actividades productivas y comerciales.

6.-OBJETIVOS

Evaluar las concentraciones ambientales del ozono troposférico (O_3) durante la contingencia sanitaria del COVID-19, en la ciudad de Cuernavaca, Morelos;

6.1- Objetivos específicos:

- Evaluar el comportamiento de la concentración ambiental de ozono y el dióxido de nitrógeno a través del Efecto de Fin de Semana.
- Identificar el régimen de sensibilidad de formación fotoquímica del ozono troposférico por medio del Efecto de Fin de Semana.
- Evaluar los cambios en los niveles de contaminación de la columna troposférica de NO_2 , HCHO y CO en mol/cm^2 , mediante el uso de imágenes satelitales generadas por el instrumento de percepción remota TROPOMI que se encuentra a bordo de la plataforma satelital Sentinel-5P.
- Analizar el comportamiento de los gases precursores de ozono mediante el uso de Isopletras.

7.-DISEÑO EXPERIMENTAL:

A continuación, se describe el diagrama de flujo mediante el cual se menciona la serie de actividades o acciones a realizar para conseguir los objetivos planteados en la presente investigación científica:

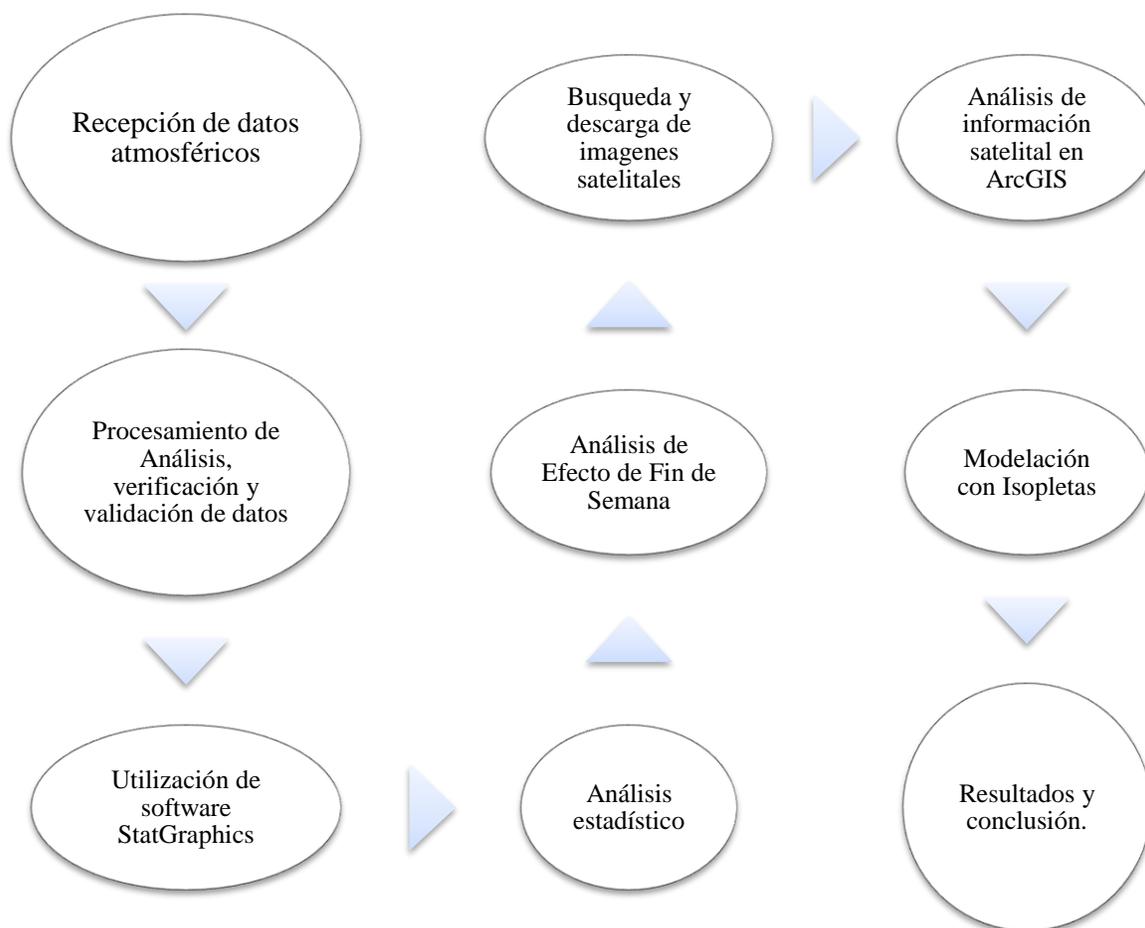


Figura 12. Diagrama de flujo de las actividades experimentales.

8.-ESTRATEGIA EXPERIMENTAL:

A continuación, se mencionan los diferentes periodos de análisis para evaluar las concentraciones ambientales de ozono troposférico (O_3):

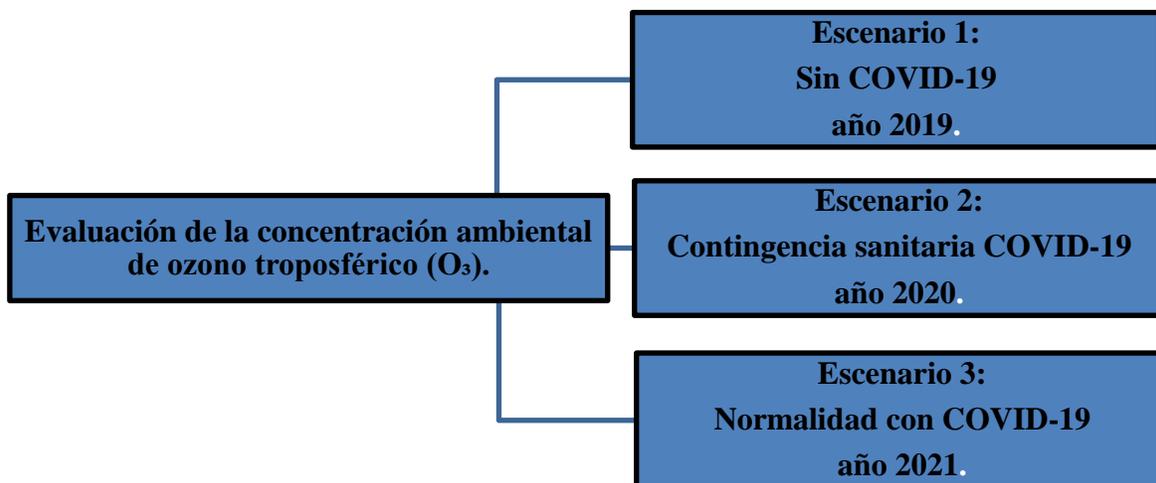


Figura 13. Diagrama de flujo de estrategia de análisis de los datos.

9.- MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo metodológico de la presente investigación ha sido elaborado de la siguiente manera:

9.1-UBICACIÓN DEL SITIO DE MONITOREO

La ciudad de Cuernavaca únicamente cuenta con una caseta de monitoreo atmosférico para recabar la información sobre las concentraciones ambientales de ozono troposférico, así como, de los contaminantes criterio y las variables meteorológicas. Dicha estación, se ubica en Calle Plaza de Armas S/N, Colonia Centro en el municipio de Cuernavaca, en el estado de Morelos.

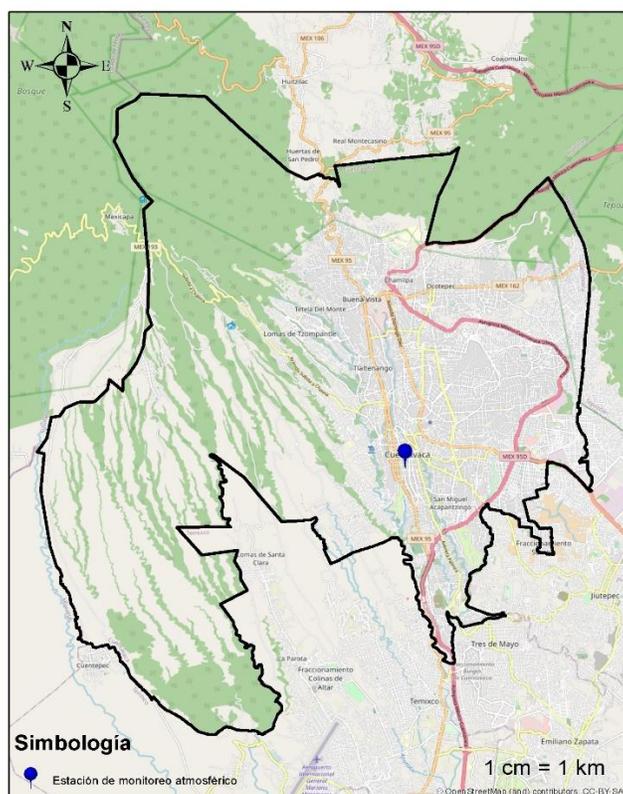


Figura 14. Ubicación del Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire en la ciudad de Cuernavaca (punto azul). Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI.

La estación de monitoreo atmosférico se encuentra a 1480 metros sobre el nivel del mar (msnm), asimismo, se adjuntan las Coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM, por sus siglas en inglés), de dicha red de monitoreo.

Coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM, por sus siglas en inglés)		
Vértice	X	Y
1	14 Q 475248 m E	2092210 m N
2	14 Q 475263 m E	2092211 m N
3	14 Q 475868 m E	2092162 m N
4	14 Q 475254 m E	2092162 m N

Figura 15. Coordenadas UTM de la estación de monitoreo en la ciudad de Cuernavaca, Morelos. Fuente: Elaboración propia con Google Earth.

9.2-CAPTURA Y VALIDACIÓN DE REGISTROS DIARIOS

Las concentraciones ambientales de ozono troposférico (O_3), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2), material particulado menor o igual a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), y material particulado menor o igual a 10 micrómetros (PM_{10}), al igual que, los principales parámetros meteorológicos como la temperatura en grados centígrados ($^{\circ}C$), humedad relativa en porcentaje (%), radiación solar en watts sobre metro cuadrado (W/m^2), y la velocidad del viento en metros sobre segundo (m/s), han sido obtenidos de la página oficial del Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA). <https://sinaica.inecc.gob.mx>

De acuerdo con la información del SINAICA, el registro de contaminantes se realiza cada hora, generando un total de 24 registros de cada contaminante y parámetro metrológico por cada día, lo que nos permite analizar y evaluar las concentraciones ambientales horarias y diarias de ozono troposférico, así como también, su variación espacial y por temporadas.

Una vez analizada y descrita la metodología para el monitoreo atmosférico, se llevó a cabo la elaboración de las bases de datos para 2019, 2020 y 2021 (hasta el mes de septiembre),

para cada uno de los contaminantes criterio y las variables antes mencionadas. Para fines prácticos, en el presente documento, solo se muestran las tablas de los valores resultantes de todos los datos analizados. Los valores mínimos fueron igual a cero, ya que en la validación se eliminaron los valores con registros negativos, por no ser de carácter representativos. Lo anterior, con base en el Manual 5 Protocolo de Manejo de Datos de la Calidad del Aire” del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2005).

9.3-CAPTURA Y VALIDACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES

La información satelital del dióxido de nitrógeno, formaldehído y el monóxido de carbono han sido obtenidos del sitio web de COPERNICUS <https://s5phub.copernicus.eu/> , la cual permite buscar, descargar, guardar y compartir capas de imágenes satelitales de diversos contaminantes casi en tiempo real.

Una vez seleccionada y descargada la información satelital del contaminante criterio y el área geográfica de estudio, también, se llevó a cabo el diseño de las bases de datos para el 2019, 2020 y 2021. Cabe señalar que, el periodo de interés para esta investigación comprende del 23 de marzo al 30 de mayo de cada año.

Posteriormente, la información se trasladó al software ArcGIS o QGIS para realizar el análisis geográfico el cual constó de realizar los recortes para delimitar la zona de estudio y poder estimar la cantidad de NO₂, HCHO y CO desde la superficie de la tierra hasta la parte superior de la troposfera, así como también, identificar los posibles cambios en los niveles de contaminación atmosférica e incluir la escala geográfica y la georreferenciación para la elaboración de los diferentes mapas.

9.1.1-Análisis estadístico de datos:

La estadística descriptiva permite analizar y describir los datos para calcular los promedios horarios, diarios, semanales, mensuales y anuales de los contaminantes criterio y de las variables meteorológicas. Asimismo, se obtuvieron las medidas de dispersión (desviación estándar), y aquellas medidas de asociación (correlaciones). Estas medidas nos permiten conocer que tan dispersos se encuentran los datos con respecto a la media, y asociaciones

entre estos e identificar posibles fuentes emisoras. Para ello, se utilizaron los programas: Excel, StatGraphics y RStudio.

9.1.2.- Distribución y estadística básica de los registros ambientales de ozono:

Las pruebas de normalidad y/o pruebas de distribución normal se realizan con el objetivo de identificar si los datos numéricos presentan una distribución normal. Para ello, se utilizó la prueba de Shapiro-Wilks. Los datos con una distribución normal se analizaron con estadística paramétrica, mientras que los datos con una distribución no normal se analizaron con estadística no paramétrica (Flores-Ruíz et al 2017).

9.1.3.-Análisis comparativo con la normatividad vigente a nivel nacional e internacional:

Las pruebas consisten en comparar si los niveles ambientales de ozono cumplen con el promedio horario y el promedio diario de 0.095 ppm, de acuerdo con los Límites Máximos Permisibles (LMP) establecidos en la NOM-020-SSA1-2014, así como también, con los estándares internacionales de la US EPA y la OMS.

9.1.4.-Comparación de promedios y medianas durante la temporada seca-cálida:

Se utilizó la prueba t, que sirve para comparar 2 muestras de datos continuos independientes que presentan distribución normal. Asimismo, se utilizó la prueba U de Mann-Whitney, que permite comparar 2 grupos de datos continuos o discontinuos independientes sin distribución normal. Para la comparación de 3 o más muestras de datos continuos o discontinuos independientes sin distribución normal se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis.

Las pruebas estadísticas antes mencionadas, permiten conocer si hay diferencias estadísticas entre sus medidas de tendencia central a través de la formulación de una hipótesis nula ($H_0 = M_1 = M_2$), y/o una hipótesis alternativa ($H_0 = M_1 \neq M_2$).

Este análisis nos ayudará a evaluar el comportamiento de la concentración de ozono en el aire ambiente, durante la suspensión temporal de actividades no esenciales por el COVID-19, y posteriormente, durante la nueva normalidad.

9.1.5.- Efecto de la temporada en la concentración ambiental de ozono:

El coeficiente de correlación de Spearman se utilizó para la correlación de 2 o más variables independientes que no presentan distribución normal, el cual permite conocer el nivel de asociación entre estas. De igual forma, el análisis de correlación facilitó la identificación de posibles fuentes emisoras con mayor contribución en la zona de estudio. Asimismo, se puede conocer el nivel de influencia que tienen estos durante la formación y el comportamiento del ozono cerca de la superficie terrestre.

En virtud de lo anterior, la prueba de Análisis de Componentes Principales (PCA por sus siglas en inglés), nos permitió conocer las variabilidades y el peso específico de los contaminantes criterio y los factores meteorológicos durante la formación, acumulación y destrucción del ozono troposférico

9.1.6.- Efecto de Fin de Semana (EFS) de O₃ y NO₂:

El análisis de Efecto fin de semana (EFS), permitió comparar los promedios diarios del ozono troposférico (O₃) en la primera semana del mes mayo para el año 2019, 2020 y 2021, debido a que en este mes se presentan los niveles ambientales y las temperaturas más altas y los mayores niveles de radiación solar. Lo anterior, con la finalidad de corroborar si las concentraciones de los días laborales difieren de los días no laborales, para ello, se estableció una hipótesis nula $H_0: \mu O_3 DL = \mu O_3 FS$. Es importante señalar que, por medio de este análisis es posible determinar el régimen de sensibilidad de formación química de ozono.

De igual manera, se compararon los promedios diarios de las concentraciones ambientales de dióxido de nitrógeno (NO₂) y el monóxido de carbono (CO), con el objetivo de identificar si hubo una disminución significativa en las emisiones de los días laborales en relación con los días no laborales. Para esto, también se estableció una hipótesis nula: $H_0: NO_2 DL = \mu NO_2 FS$, y $H_0: \mu CO DL = \mu CO FS$, respectivamente.

9.1.7.- Percepción Remota para estudios de calidad del aire:

El análisis de la distribución espacial de las columnas promedio de contaminantes atmosféricos, permitió realizar una comparación para el periodo de marzo a mayo del año

2019, 2020 y 2021, respectivamente. De igual manera, se estimó el porcentaje de reducción de los contaminantes durante el cierre temporal de actividades por el COVID-19.

Para ello, se evaluaron las concentraciones de dióxido de nitrógeno (NO_2), monóxido de carbono (CO) y el formaldehído (HCHO), toda vez que, estos contaminantes se utilizan como un proxy de las emisiones de óxidos de nitrógeno y de los compuestos orgánicos volátiles, mediante el uso de imágenes satelitales generadas por el instrumento de percepción remota denominado TROPOMI, el cual se encuentra a bordo de la plata satelital de Sentinel-5P, y el procesamiento se realizó con ayuda del software ArcGIS 10.8, y QGIS 3.16.8.

La evaluación del NO_2 , CO y HCHO, es con la finalidad de analizar la posible relación durante la formación de ozono troposférico en la zona de estudio.

9.1.8.-Análisis de Modelación con Isopletas:

Una vez que se conozcan los niveles de NO_2 y CO en un determinado ámbito de estudio, se puede estudiar la relación de estos contaminantes con la concentración de ozono mediante el uso de isopletas. Es decir, utilizando la herramienta de modelización tridimensional se podrá representar la concentración de O_3 en función de sus precursores por medio de isopletas en el software StatGraphics. Lo anterior, con la finalidad de identificar el nivel óptimo de los gases de sus precursores de ozono para que no se incumplan los estándares de normatividad a nivel nacional e internacional.

Finalmente, para la interpretación de los datos, se realizarán histogramas de frecuencia, series de tiempo y diagramas de caja y bigotes, con la finalidad de identificar aquellos patrones o variaciones temporales de las concentraciones ambientales de ozono, y así determinar el comportamiento de este durante el confinamiento debido a la contingencia sanitaria y al inicio de la nueva normalidad en la ciudad de Cuernavaca, Morelos.

10.-RESULTADOS Y DISCUSIÓN:

Los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación se presentan de acuerdo con lo establecido en el apartado de materiales y métodos:

10.1-Distribución y estadística descriptiva de los registros ambientales de ozono:

1.- La prueba de distribución normal para las concentraciones ambientales de ozono (ppm) troposférico del año 2019, indica que el conjunto de datos no presenta una distribución normal. Nótese, que los datos tienen una mayor frecuencia de distribución entre 0.020 y 0.030 (ppm). Es decir, debido a que el valor-P es menor a 0.05 (4×10^{-11}), se puede rechazar la hipótesis de que la concentración de ozono proviene de una población normalmente distribuida con un nivel de confianza del 95 %.

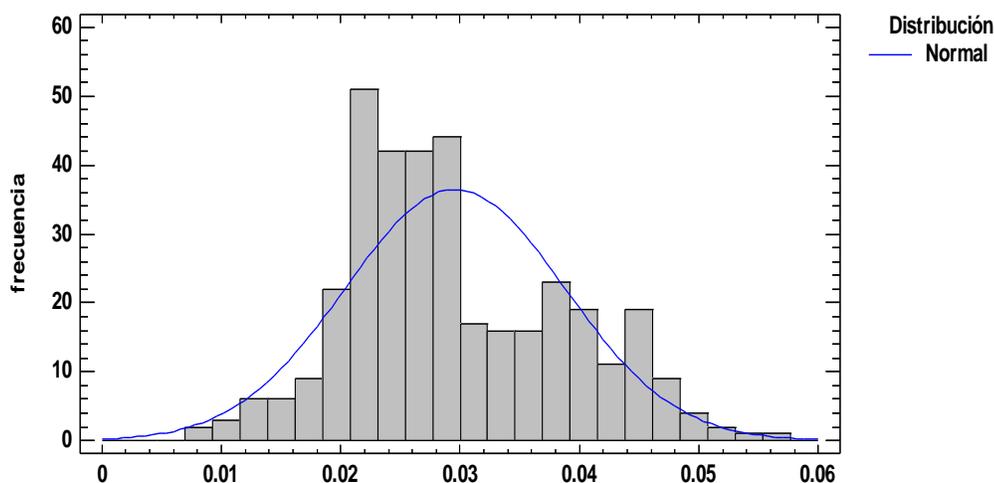


Figura 16. Histograma de frecuencias para las concentraciones de ozono (ppm) 2019.

Por otra parte, el diagrama de caja y bigotes nos indica que el valor de la mediana de las concentraciones ambientales de ozono 2019, se ubica en 0.030 (ppm), y el rango de los datos se ubican entre 0.020 y 0.040 (ppm). Asimismo, el valor mínimo se presenta en 0.010 (ppm), y el valor máximo se presenta en 0.055 (ppm), asimismo, se presenta un dato anómalo, mismo que se ubica fuera del rango.

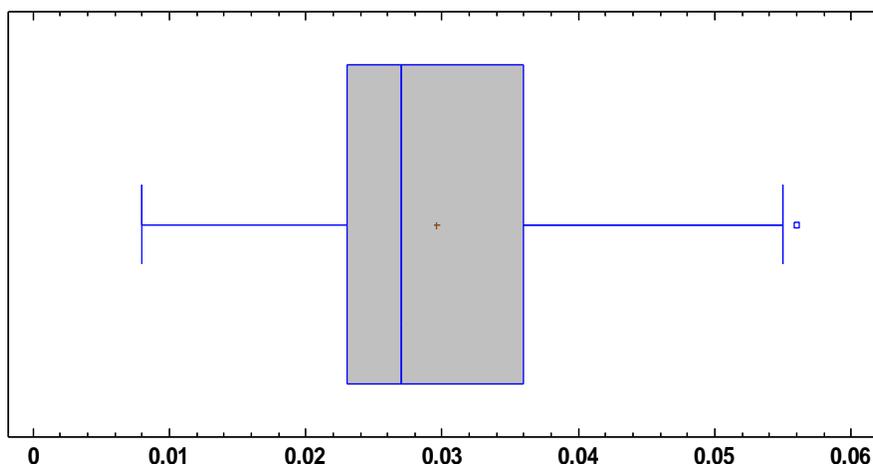


Figura 17. Concentraciones de ozono 2019.

El inicio de bigote representa el valor mínimo (\lfloor), el límite inferior de la caja al percentil 25 y el límite superior de la caja al percentil 75, en el interior de la caja se presenta la mediana con una (+), y el promedio con un ($\bar{}$), el bigote superior corresponde al final (\rfloor), y el (\square) representa datos anómalos o atípicos.

La prueba de distribución normal para las concentraciones ambientales de ozono troposférico para el año 2020, indica que, el conjunto de datos proviene de una población con una distribución distinta a la normal.

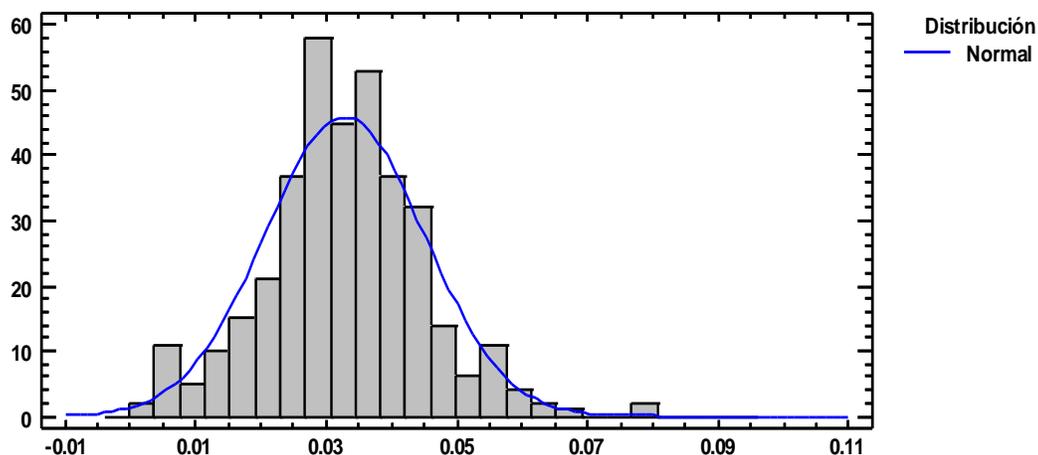


Figura 18. Histograma de frecuencias para las concentraciones ambientales de ozono (ppm) 2020.

El diagrama de caja y bigotes, indica que, la mediana de las concentraciones ambientales de ozono (ppm) se ubica entre las 0.033 (ppm), y el rango de los datos se ubican entre 0.025 y 0.040 (ppm). Asimismo, el valor mínimo se presenta en 0.025 (ppm), y el valor máximo en 0.078 (ppm), así como también, se presenta datos atípicos, mismos que se encuentran fuera del rango.

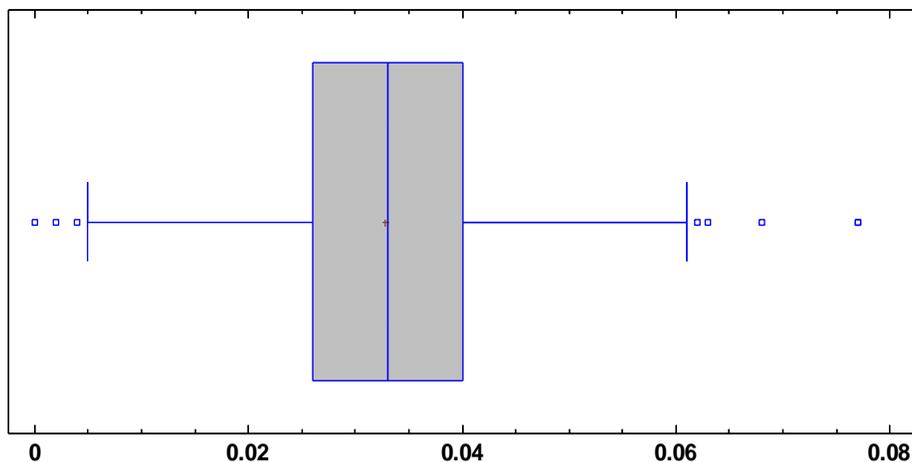


Figura 19. Concentraciones de ozono 2020.

De igual forma, la prueba de distribución normal para las concentraciones ambientales de ozono troposférico (ppm) para el año 2021, muestran que, los datos no presentan una distribución normal.

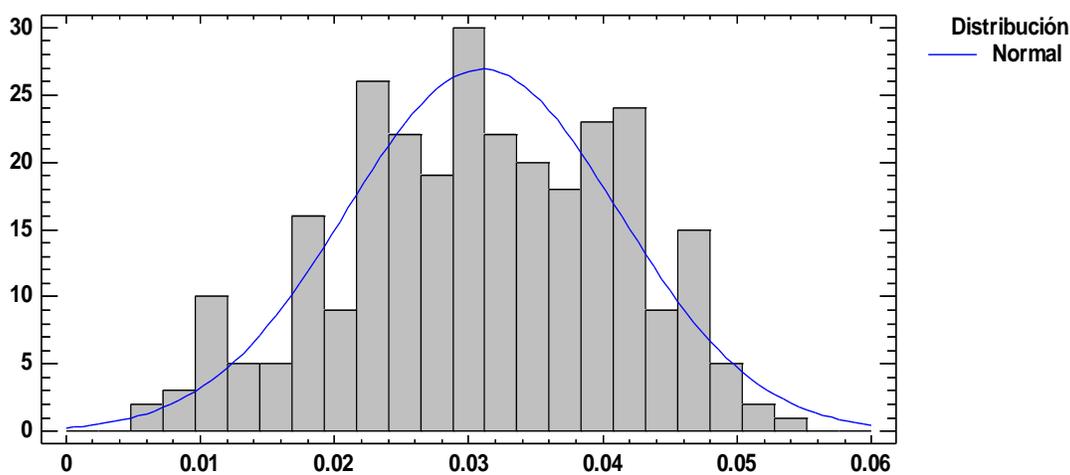


Figura 20. Histograma de frecuencias para las concentraciones ambientales de ozono (ppm) 2021.

Con base en el diagrama de caja y bigotes, se observa que, la mediana de los datos del año 2021 se ubica entre 0.033 (ppm), asimismo, la concentración mínima estuvo entre los 0.004 ppm, y la concentración máxima se presentó aproximadamente entre los 0.055 ppm.

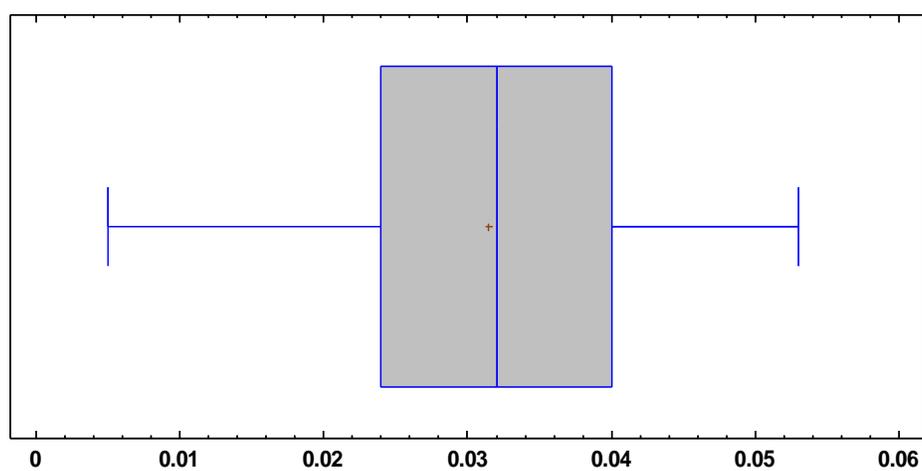


Figura 21. Concentración de ozono troposférico 2021.

10.2.-Análisis comparativo de ozono frente a la normatividad nacional e internacional:

Las mediciones para el año 2019, muestran que, en la ciudad de Cuernavaca, se incumplieron los límites máximos permisibles (LMP), del promedio horario al igual que el promedio diario de 24 horas que se establecen en la NOM-020-SSA1-2014. Durante la época de invierno (fría), y la primavera (seca-cálida), se presentaron las concentraciones ambientales más elevadas, es decir 101 ppm para la zona de estudio. Ver figura 22 y 23, respectivamente.

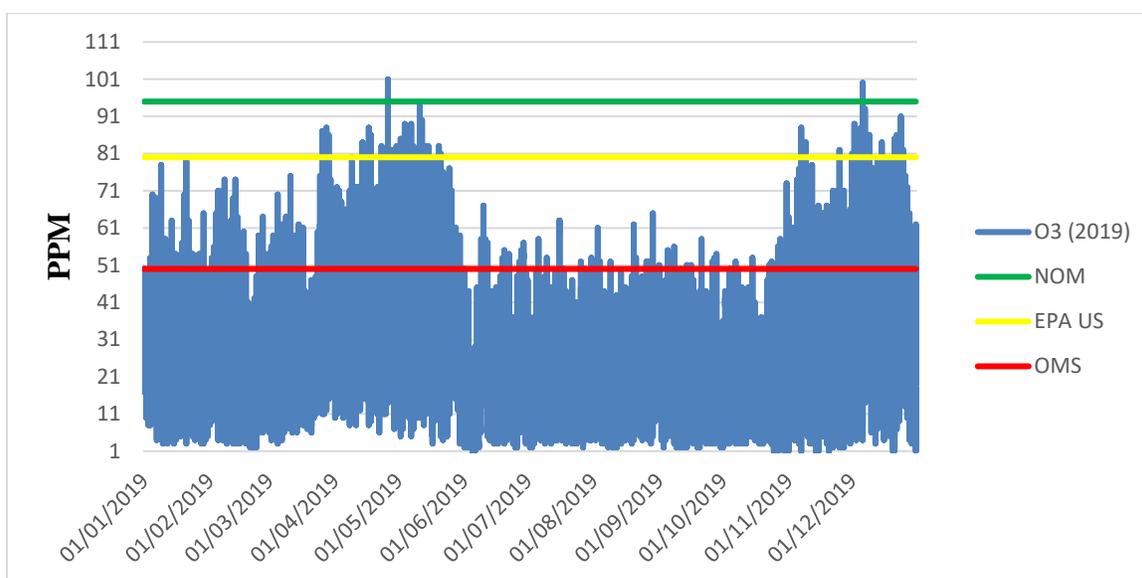


Figura 22. Análisis comparativo de los registros horarios de ozono con los límites máximos permisibles de la NOM, US EPA y la ONU para el año 2019.

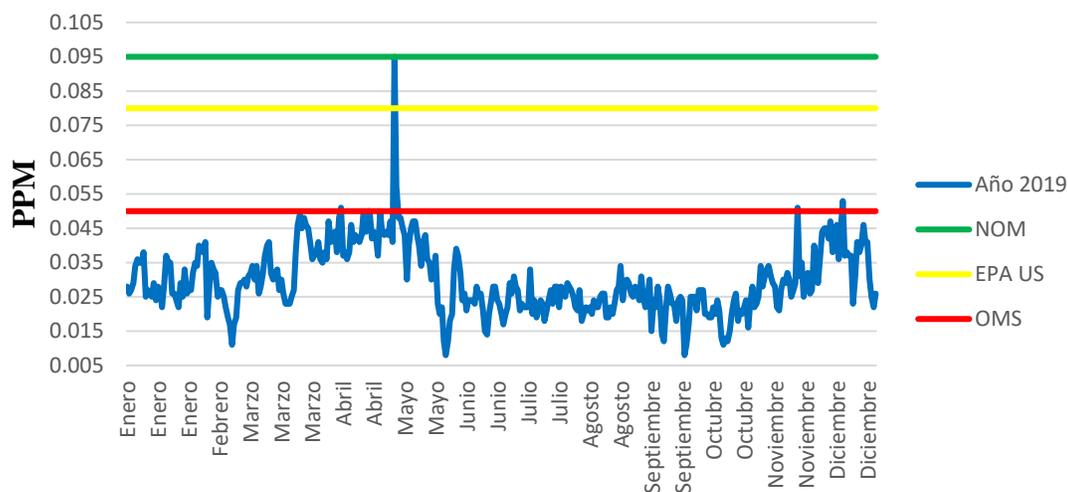


Figura 23. Análisis comparativo de los promedios diarios de ozono con límites máximos permisibles de la NOM, US EPA y la ONU para el año 2019.

En 2020 los resultados indican que las concentraciones de ozono troposférico también rebasaron los límites permisibles para 1 hora que establece la NOM. Sin embargo, el análisis del promedio diario indica que, no se rebasaron los límites máximos. Asimismo, el análisis comparativo con la normatividad internacional, indican que, los registros ambientales rebasaron los estándares establecidos por parte de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA, por sus siglas en ingles), así como también, los de la Organización Mundial de la Salud (OMS). Ver figura 24 y 25, respectivamente.

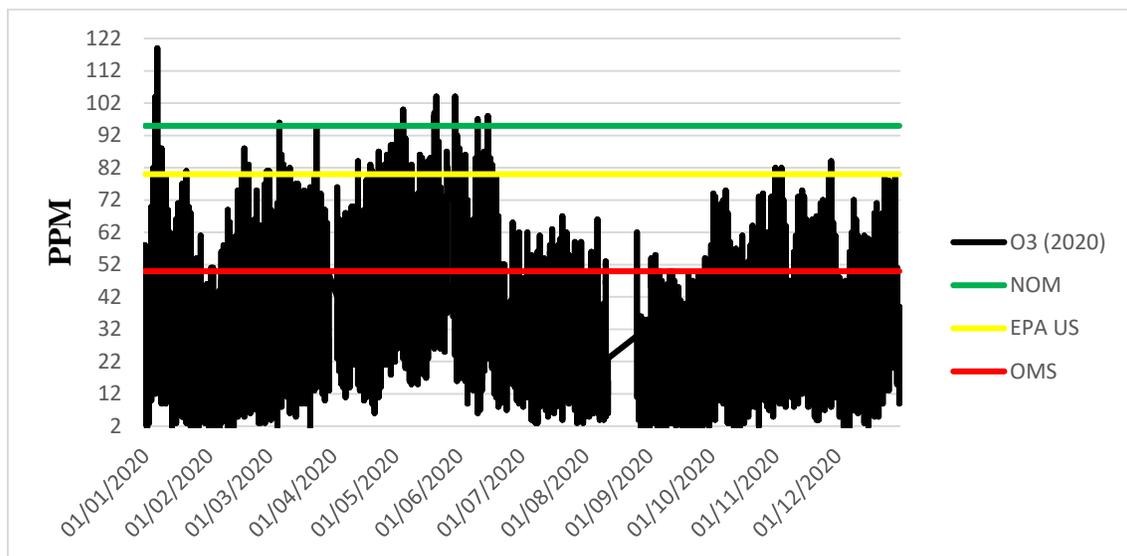


Figura 24. Análisis comparativo de los registros horarios de ozono con los límites máximos permisibles de la NOM, US EPA y la ONU para el año 2020.

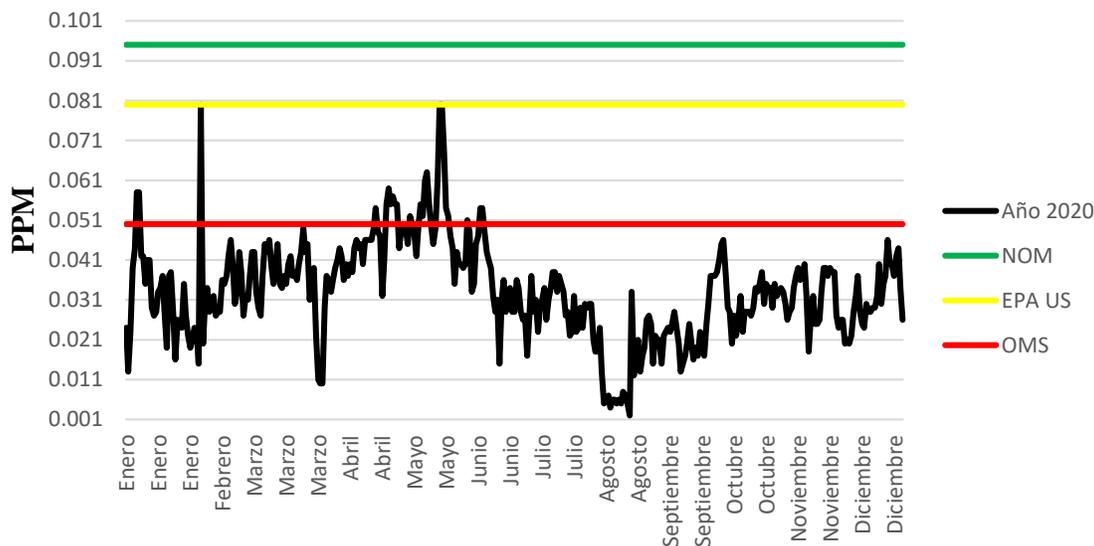


Figura 25. Análisis comparativo de los promedios diarios de ozono con límites máximos permisibles de la NOM, US EPA y la ONU para el año 2020.

Los registros de las concentraciones de ozono en 2021 muestran que, se incumplen los valores máximos permisibles de las concentraciones horarias establecidas en la normatividad nacional e internacional. Los registros indican que, durante las temporadas de

invierno y primavera se presentaron los índices más altos de contaminación de este gas secundario. Para el análisis de concentraciones diarias, se observó que no se incumplen los estándares establecidos por parte de la NOM y la US EPA, sino, únicamente los valores máximos permisibles por parte de la OMS durante la temporada de invierno y primavera.

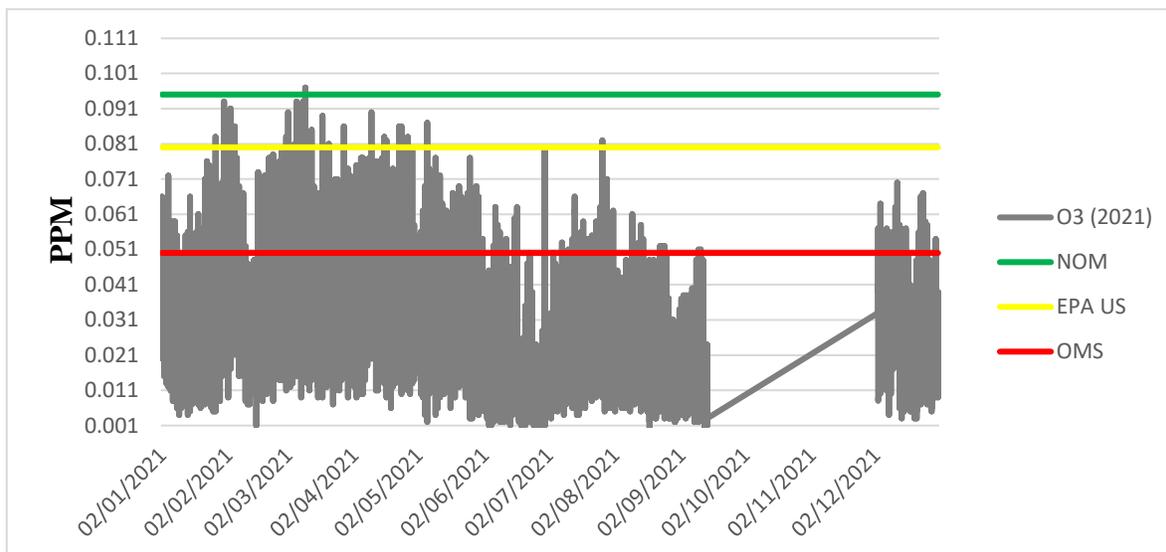


Figura 26. Análisis comparativo de los registros horarios de ozono con los límites máximos permisibles de la NOM, US EPA y la ONU para el año 2021.

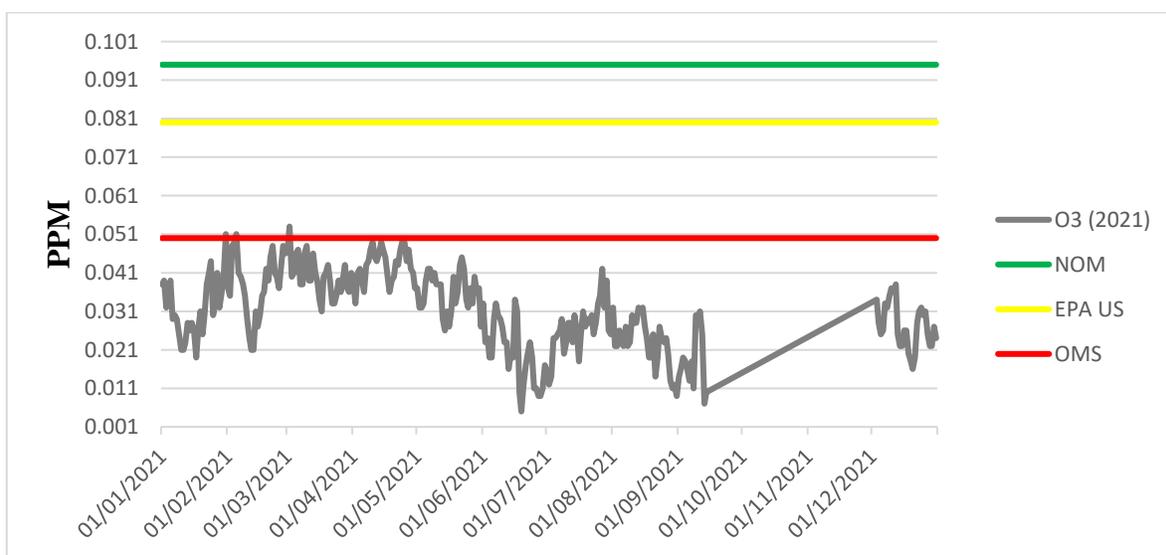


Figura 27. Análisis comparativo de los promedios diarios de ozono con límites máximos permisibles de la NOM, US EPA y la ONU para el año 2021.

10.3-Efecto estacional en la concentración ambiental de ozono:

En 2019, se observa que, durante la época seca – cálida, las concentraciones ambientales de ozono (ppm) alcanzaron su pico máximo, debido al aumento de la temperatura, aunado a la poca nubosidad y a la baja velocidad del viento lo que evita la dispersión de contaminantes primarios y genera mayor acumulación e interacción entre ellos en la zona de estudio. Esto nos puede indicar que probablemente la formación de ozono es local, es decir, los vientos débiles evitaron la dispersión de contaminantes primarios y favorecieron la formación de contaminantes secundarios atmosféricos. Sin embargo, al inicio de la temporada de lluvias y durante toda la época de verano las concentraciones descendieron en comparación con los registros de la estación de primavera. Lo anterior, puede explicarse debido al nivel de asociación poco significativo que se presentó con la velocidad del viento ($R=0.50$), y la inestabilidad atmosférica, la cual es caracterizada por una mayor velocidad del viento lo que favorece la dispersión de contaminantes, al igual que un nivel bajo de asociación con la radiación solar ($R=0.35$), aunado a la alta nubosidad y un alto porcentaje de humedad relativa y el descenso de la temperatura ($R=0.24$), que disminuyen la concentración de ozono en la troposfera. Posteriormente, durante la estación de otoño las condiciones climáticas cambiaron y los niveles ambientales de ozono tuvieron un repunte en este periodo, y durante toda la época de invierno en el sitio de estudio (Ver figura 28).

En ese sentido, el resultado de la prueba de Kruskal-Wallis indica que, hubo una diferencia estadística en los niveles ambientales de ozono (ppm), entre la estación de primavera, verano, otoño e invierno en 2019 ($p<0.05$). Es decir, la concentración ambiente de ozono troposférico en la ciudad de Cuernavaca, Morelos, disminuyó durante la temporada de mayor precipitación comparada con los registros de primavera e invierno. Lo anterior, puede explicarse debido a la inestabilidad atmosférica, la cual es caracterizada por una mayor velocidad del viento, al igual que una baja radiación solar, alta nubosidad y un alto porcentaje de humedad relativa que disminuyen la concentración de ozono en la troposfera.

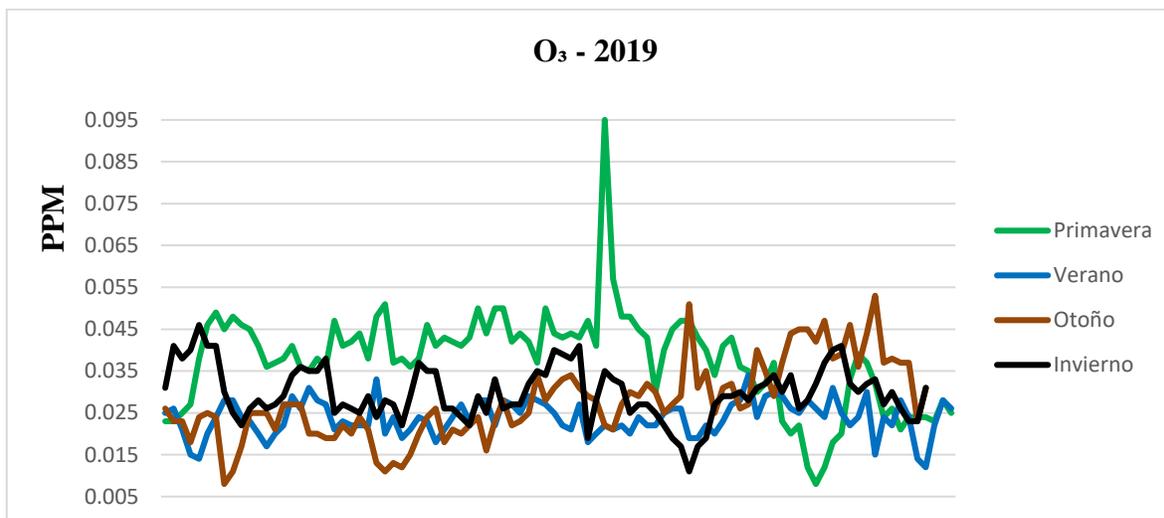


Figura 28. Análisis comparativo de los niveles de ozono por temporada para el año 2019.

En 2020, durante los meses de la temporada seca – cálida, se encontró la mayor concentración ambiental de ozono troposférico (ppm) en la ciudad de Cuernavaca, Morelos, debido al nivel asociación con la baja velocidad del viento ($R=0.55$), las altas temperaturas ($R=0.70$), y por la poca nubosidad presente en la atmósfera lo que permite que los gases primarios emitidos se acumulen en la troposfera inferior e interactúen entre sí generando reacciones fotoquímicas. En lluvias y el inicio de la época de verano se observaron cambios en el nivel de asociación entre el ozono y las variables meteorológicas, por ejemplo, la correlación fue baja con la velocidad del viento ($R=0.55$), lo mismo ocurrió con la radiación solar ($R=0.53$), y finalmente con la temperatura ($R=0.34$), lo que ocasionó una disminución en las concentraciones ambientales de este gas. Sin embargo, al finalizar el verano y durante la estación de otoño los niveles de ozono tuvieron un repunte, así como también durante el invierno (Ver figura 29).

Asimismo, el resultado de la prueba de Kruskal-Wallis indica que, también hubo una diferencia estadística poco significativa en los niveles ambientales de ozono (ppm), entre la estación de primavera, verano, otoño e invierno debido a que el valor-P fue menor a 0.05 (0), para el año 2020.

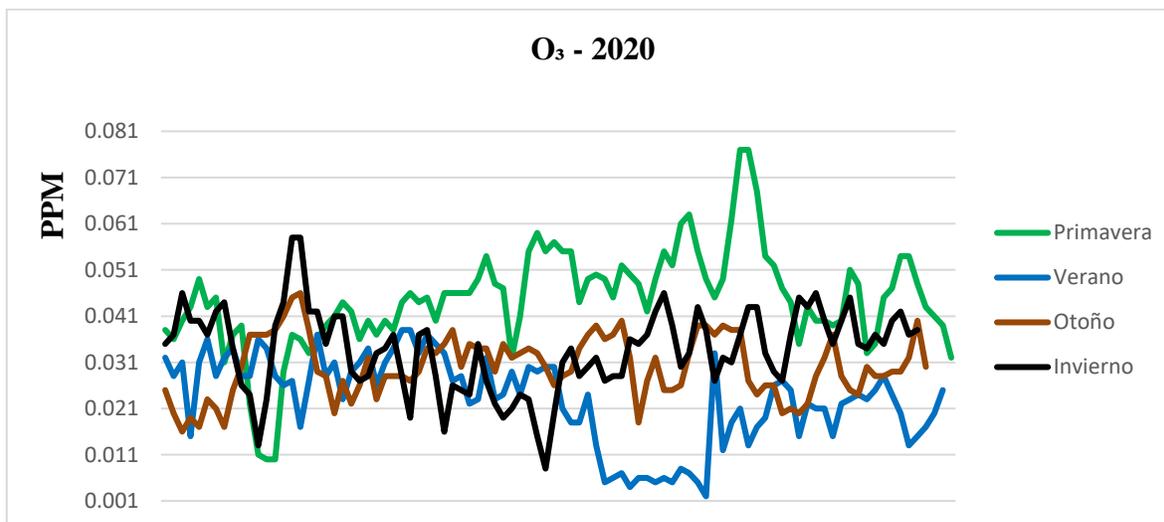


Figura 29. Análisis comparativo de los niveles de ozono por temporada para el año 2020.

En 2021, durante la implementación de la reapertura parcial de algunos sectores públicos, privados y sociales, las concentraciones ambientales de ozono también presentaron una fuerte asociación con las temperaturas ($R=0.65$) y los vientos débiles ($R=0.28$) en el periodo de la primavera, generando así las condiciones necesarias para el estancamiento de los gases primarios y el aumento de estos, favoreciendo las reacciones fotoquímicas en la ciudad de Cuernavaca, Morelos. Sin embargo, el registro de la concentración máxima de ozono indica que, hubo una reducción en los niveles de ozono en comparación con el año anterior, el cual paso de 0.077 a 0.055 ppm en esa misma temporada de primavera. Lo anterior puede atribuirse al aumento en la movilidad del sector vehicular que emiten óxidos de nitrógeno a la atmósfera y estos, eliminan el ozono troposférico.

En lluvias e inicio del verano las concentraciones máximas de ozono tuvieron un descenso, debido al bajo nivel de asociación con la velocidad del viento ($R=0.28$). De igual manera, la correlación alta negativa con la humedad alta ($R=0.76$) y la alta presencia de nubosidad contribuyeron en el lavado de la atmósfera y en la reducción de los niveles ambientales de ozono para la zona de estudio. Posteriormente, al final del otoño y el inicio del periodo invernal, las concentraciones tuvieron un repunte en comparación con la estación de verano (Ver figura 30).

Asimismo, se hace la aclaración que, para el análisis del año 2021, la medición de O₃, SO₂, CO, NO₂ y de la radiación solar estuvo limitada, porque hubo meses en los que no se realizó el monitoreo atmosférico, lo cual dificultó el análisis de estos. Es decir, únicamente se cuenta con datos disponibles hasta el 14 de septiembre y no hay datos preliminares para la tercera y cuarta semana del mes de septiembre, así como también, para todo el mes de octubre y noviembre, y hasta el 03 de diciembre del mismo año.

Por su parte, la prueba de Kruskal-Wallis indicó que, las concentraciones por temporadas del año 2021 también presentaron una diferencia estadística poco significativa durante la estación de primavera, verano, otoño e invierno, toda vez que, el valor-P fue menor a 0.05 (0).

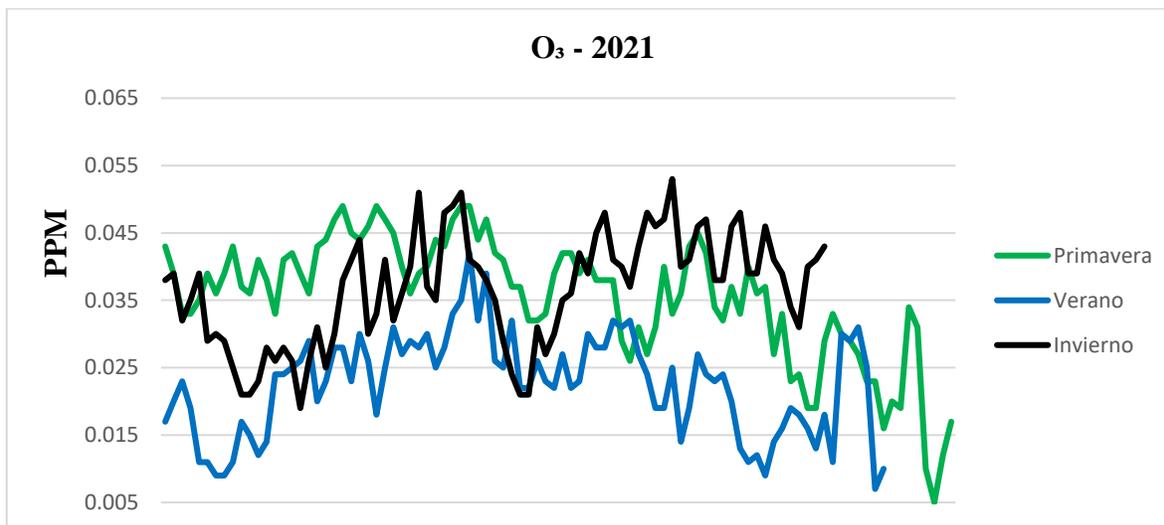


Figura 30. Análisis comparativo de los niveles de ozono por temporada para el año 2021.

Por último, el análisis de comparación de medianas entre 2019, 2020 y 2021 de las concentraciones de ozono troposférico indicó que, si existe una diferencia estadística significativa durante la estación seca – cálida (primavera), debido a que el valor-P fue menor a 0.05 (1.8×10^{-9}). En la siguiente sección se discute con mayor precisión el efecto del confinamiento sobre los niveles ambientales de ozono en la zona de estudio.

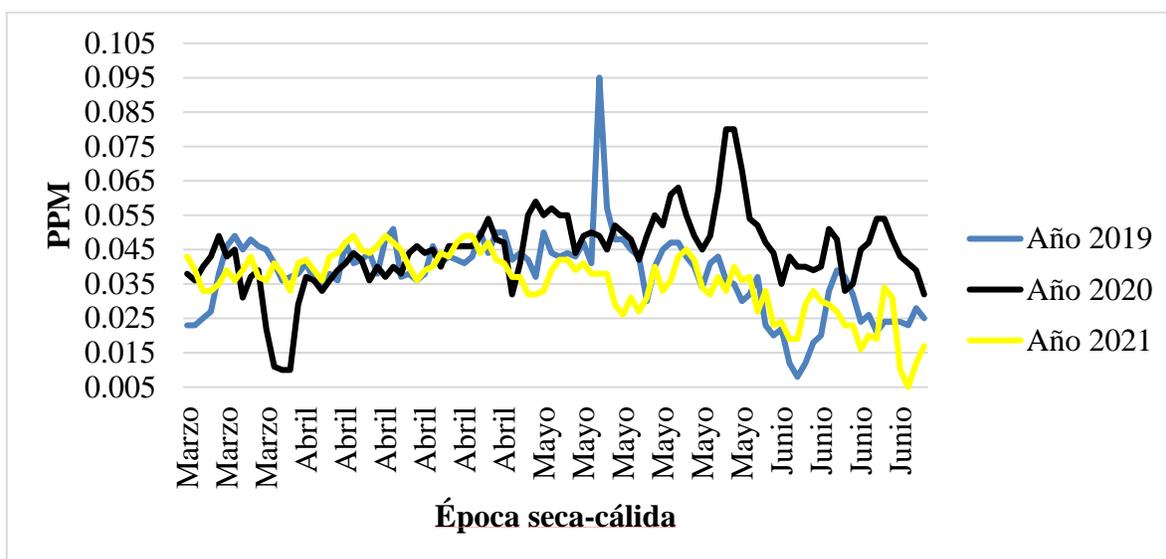


Figura 31. Análisis comparativo de los niveles de ozono durante la temporada seca-cálida para el año 2019, 2020 y 2021.

10.4-Efecto del confinamiento sobre los niveles ambientales de ozono:

Con el objetivo de identificar y evaluar el impacto causado por la implementación del cierre temporal de actividades no esenciales en el sector público, privado y social, debido a la contingencia sanitaria generado por el COVID-19, y determinar si el confinamiento mejoró o empeoró la calidad del aire por ozono troposférico, se compararon las concentraciones ambientales del año 2019, 2020 y 2021 para la zona de estudio:

La comparación anual entre 2019 y 2020, indicó que, hubo una diferencia estadística significativa debido a que el valor-P es menor a 0.05 (7×10^{-6}), y una diferencia porcentual del 14 % en la concentración ambiental de ozono troposférico para el año 2020 en comparación con el año anterior. Es decir, la concentración ambiental de este gas secundario aumentó a pesar de las restricciones en la movilidad del sector vehicular, lo que ocasionó el deterioro de la calidad del aire. Asimismo, los niveles ambientales de ozono permanecieron por más tiempo en la temporada seca-cálida en la zona de estudio.

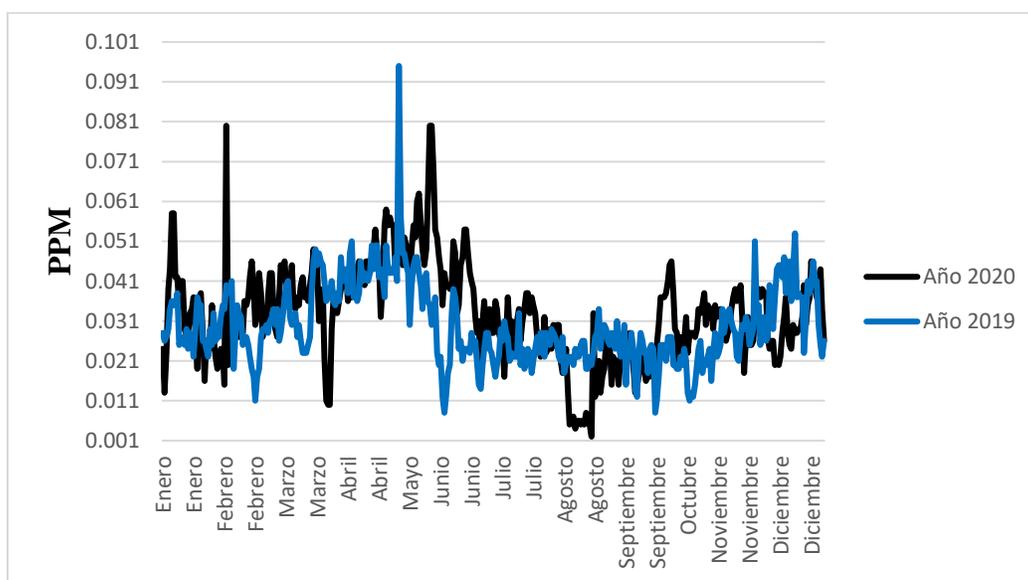


Figura 32. Concentración ambiental de ozono troposférico de 2019 y 2020.

De igual manera, en 2019 el resultado del análisis de correlación del ozono troposférico con los contaminantes criterio nos muestra que, se presentó una correlación alta significativa

($R=0.82$) con las PM_{10} , asimismo, se presentó una alta correlación significativa ($R=0.73$), con las $PM_{2.5}$ en la ciudad de Cuernavaca, Morelos. Lo que sugiere que, posiblemente comparten las mismas fuentes de emisión (fijas, de área, evaporativas y naturales), y que la formación y aumento de ozono influyó en la generación de partículas secundarias por la mezcla de ozono y emisiones por fuentes de área, tales como la combustión doméstica, la combustión comercial e industrial, aunado al manejo y distribución de gas L.P., y al proceso de la combustión de combustibles fósiles por el tráfico rodado y por las emisiones de fuentes fijas (industrias), así como también, por la quema de biomasa tal y como se reporta en el inventario de emisiones de Morelos (2014), y por Jia et al (2017).

El estudio realizado por la OCDE (2017), indicó que, en la ciudad de Cuernavaca, Morelos, las principales fuentes de emisión de $PM_{2.5}$, se encuentra conformada principalmente por actividades comerciales y empresariales, por ejemplo, los restaurantes, las plantas industriales, las casas habitación, la pavimentación de caminos, etcétera. Estas fuentes representan el 62 % de las emisiones registradas, y únicamente, el 4 % de las partículas finas es atribuido por fuentes vehiculares. Lo que coincide, con los resultados obtenidos con el Inventario de Emisiones a la Atmósfera de Contaminantes en el Estado de Morelos (2014).

En Cuernavaca, las principales emisiones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ son generados principalmente por las fuentes de área, las fuentes móviles y fuentes naturales. Es decir, el 63.58 % de las partículas de PM_{10} y el 72.22 % de $PM_{2.5}$, son emitidas principalmente por fuentes de área en el estado de Morelos. Con base con el análisis de emisiones por contaminantes de municipios, (2014), en Cuernavaca, Morelos, se emiten principalmente $PM_{2.5}$, PM_{10} , CO, COV, NO_x , SO_2 y NH_3 .

Por otra parte, el Análisis de Componentes Principales (PCA) para el 2019 indicó que, la formación de ozono estuvo conformada por 2 componentes principales en 64.15 % (PM_{10} y $PM_{2.5}$). Toda vez que, estas variables tuvieron valores iguales o mayores que 1.0. (Ver figura 27).

Componente		Porcentaje de	Porcentaje
Número	Eigenvalor	Varianza	Acumulado
1	2.70221	45.037	45.037
2	1.14703	19.117	64.154
3	0.863613	14.394	78.548
4	0.806412	13.440	91.988
5	0.361446	6.024	98.012
6	0.119291	1.988	100.000

Figura 33. Porcentaje de los componentes principales para ozono 2019.

También, es posible que la alta concentración de partículas puede debilitar o dispersar la radiación solar e inhibir la producción de O₃. Es decir, los aerosoles como PM_{2.5} tiene la capacidad de dispersar o absorber la radiación solar, resultando en una afectación para la meteorología terrestre y la dispersión de contaminantes de acuerdo con Sicard et al (2020).

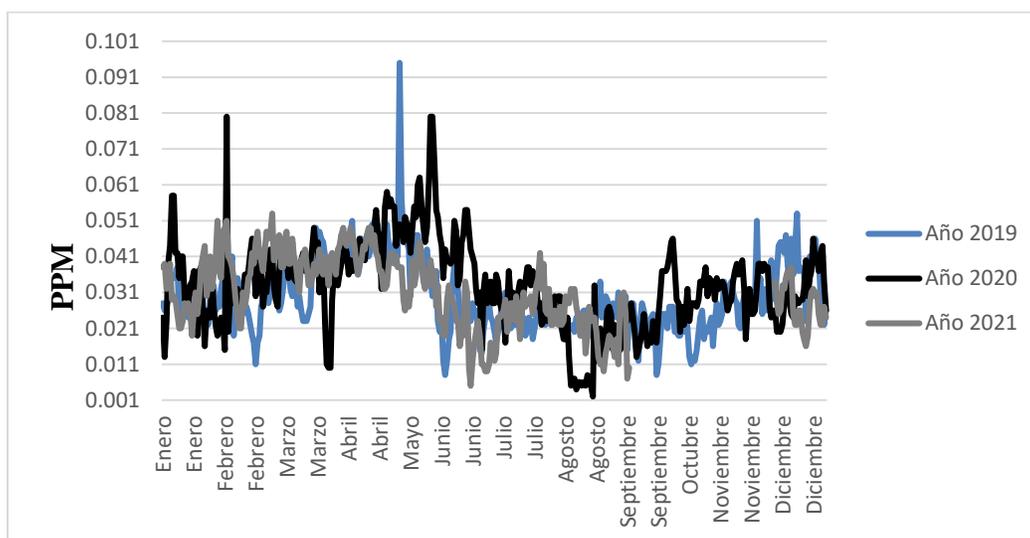


Figura 34. Comparación de concentraciones ambientales de ozono troposférico.

El resultado del análisis de correlación para 2020 nos indicó que, se presentaron también correlaciones altas significativas con PM₁₀ (**R=0.67**), PM_{2.5}, (**R=0.51**), y un nivel de asociación medio con CO (**R=0.41**). Lo que posiblemente comparten las mismas fuentes de emisión, y que la formación de ozono influyó en la generación de partículas secundarias (Fu et al, 2020). Asimismo, las restricciones de movilidad de algunos sectores públicos,

privados y sociales debido a la contingencia sanitaria por el COVID-19, ocasionaron la disminución de los niveles ambientales de los contaminantes criterio, por lo que, los niveles bajos de material particulado también pueden causar un aumento en el nivel de ozono debido a los impactos de la fotoquímica del O_3 y la química heterogénea en superficie de aerosoles. Es decir, las bajas concentraciones de aerosoles y de material particulado absorbieron menores cantidades de radiación solar en la atmósfera, esto, permitió que hubiera niveles más altos de radiación solar en la superficie para la generación de O_3 . (Jia et al, 2017; Parra, 2017)-

Considerando que en Morelos (2014), las fuentes móviles contribuyen con el 49.50 % de las emisiones de los NO_x y el 68.82 % del CO , la disminución parcial o total del parque vehicular en la zona de estudio provocó cambios en los tipos de fuentes de emisión para algunos contaminantes.

Por ejemplo, la evaporación de combustibles fósiles directamente de los tanques de almacenamiento y de las fuentes de distribución, así como también, desde los tanques estacionarios son una fuente importante de COV en la atmósfera. De igual manera, la evaporación de otros compuestos relacionados con los solventes de limpieza y en los productos de pinturas y de limpieza de superficies industriales, artes gráficas, tinta de impresoras contribuyen de manera importante en el aumento de concentraciones de gases en la atmósfera (Peralta et la, 2020; INECC, 2021).

De igual manera, el inventario de emisiones señala que, los COV , al igual que la formación de material particulado provienen de las fuentes domésticas con un 61.86 %, seguido por 12.61 % por un uso doméstico de solventes y por el manejo de gas L.P. en un 10.03%.

El inventario de emisiones para el estado de Morelos (2014), señala también que las emisiones de $PM_{2.5}$ se emiten principalmente de 3 sectores en Morelos, por la combustión doméstica, las quemas agrícolas y la industria de alimentos y bebidas. Las partículas de PM_{10} provienen por el sector doméstico, emisiones erosivas y la labranza agrícola, y las emisiones de CO provienen principalmente del parque vehicular y del sector doméstico.

Por su parte, el Análisis de Componentes Principales (PCA), para el año 2020, muestra que, la formación de ozono estuvo favorecida principalmente por 2 componentes en un 66.15 % (PM₁₀, PM_{2.5} y CO). Toda vez que, estas variables tuvieron valores iguales o mayores que 1.0.

Componente		Porcentaje de	Porcentaje
Número	Eigenvalor	Varianza	Acumulado
1	2.55675	42.612	42.612
2	1.41258	23.543	66.155
3	0.928428	15.474	81.629
4	0.524835	8.747	90.377
5	0.418816	6.980	97.357
6	0.158592	2.643	100.000

Figura 35. Porcentaje de los componentes principales para ozono 2020.

Por lo que, las bajas concentraciones de aerosoles y de otras partículas en la atmósfera ocasionaron una mayor interacción de las especies de COV emitidas por las fuentes de área (sector doméstico), durante el confinamiento temporal con la radiación solar, aunado a las altas temperaturas y los vientos muy débiles, generando así el aumento de los niveles de ozono en la zona de estudio.

Complementariamente, también se realizó la comparación anual de los registros diarios entre el 2020 y 2021, con la finalidad de establecer si la reapertura parcial o total de algunos sectores sociales e industriales contribuyeron al mejoramiento de la calidad del aire en la zona de estudio, el resultado indicó que, la concentración de ozono del 2021 se redujo un 4 % en comparación con el año anterior. Esta reducción del ozono troposférico permitió mejorar la calidad del aire en la zona de estudio. La reducción de los niveles de ozono puede atribuirse al aumento de las emisiones por parte del sector vehicular, así como también, al aumento en las operaciones diarias por parte del sector industrial durante al retorno hacia la nueva normalidad. Sin embargo, los niveles ambientales de este contaminante secundario continuaban siendo más altos en comparación con los datos registrados para el año 2019.

Asimismo, en 2021 se obtuvo una correlación fuerte significativa ($R=0.79$), con PM_{10} , ($R=0.57$), y con $PM_{2.5}$. Los resultados indican que, posiblemente las altas concentraciones de ozono en la zona de estudio promueven la formación de partículas secundarias bajo fuertes condiciones de oxidación atmosférica, y esto, favorece el aumento de la concentración de PM_{10} debido a los niveles altos de radiación solar cerca de la superficie (Jia et al, 2017; Fu et al, 2020).

El repunte de las concentraciones de las partículas puede ocasionar la dispersión o absorción de la radiación solar e inhibir la producción de O_3 . Lo que puede explicar la mínima reducción de las concentraciones de ozono durante el retorno de algunas actividades y el plan de nueva normalidad, el cual incluye el aumento paulatino de emisiones de NO_x por fuentes móviles (autos particulares, motocicletas, transporte público, etcétera), aunado a las condiciones meteorológicas que se presentaron.

Cuernavaca, Morelos puede caracterizarse por tener fuentes mixtas que provean los gases precursores de ozono, por ejemplo, el inventario de emisiones de Morelos (2014), menciona que, el 51.76 % de las emisiones de COV provienen de fuentes de área por el uso doméstico de gas, y el uso doméstico de solventes del sector industrial, pero también menciona que las fuentes naturales emiten el 35.21 % de ese mismo gas. En ese mismo sentido, los NO_x pueden emitirse no solo por el parque vehicular, sino también por emisiones biogénicas en un 19.13 % y en menor proporción, por la industria del vidrio, cemento y cal.

Para el Análisis de Componentes Principales (PCA) 2021, se observó que, las concentraciones ambientales de ozono estuvieron favorecida principalmente por 2 componentes en un 78.01 % (CO y NO_2). Toda vez que, estas variables tuvieron valores iguales o mayores que 1.0.

Componente		Porcentaje de	Porcentaje
Número	Eigenvalor	Varianza	Acumulado
1	2.59005	51.801	51.801
2	1.31066	26.213	78.014
3	0.459693	9.194	87.208
4	0.430876	8.618	95.825
5	0.208725	4.175	100.000

Figura 36. Porcentaje de los componentes principales para ozono 2021.

Por su parte, Salcedo et al, (2012), también identificó que no solo en las áreas industriales se presentan las concentraciones más altas de CO y NO₂, sino que, las principales avenidas de la ciudad son fuentes de este contaminante, por ser avenidas muy transitadas con tráfico mixto, es decir, circulación de vehículos de gasolina, diésel y gas L.P., y a las múltiples emisiones de las fuentes de área en la zona de estudio.

De acuerdo con el Inventario de Emisiones a la Atmósfera de Contaminantes en el Estado de Morelos (2014), los tipos de combustibles más usados en la industria son: Diésel, combustóleo, gas LP., gas natural, biogás, combustibles formulados, coque de petróleo y bagazo, contribuyendo así en la emisión de NO_x, SO₂, PM₁₀ y PM_{2.5}. De igual manera, el parque vehicular, el manejo, distribución y consumo de gas L.P. las emisiones evaporativas de combustibles fósiles y el uso de solventes siguen siendo las principales fuentes de emisión de NO_x y COV en el estado de Morelos.

Por último, en la ciudad de Cuernavaca, Morelos debido al clima cálido y soleado principalmente durante la temporada seca – cálida (primavera), las contribuciones por parte de las fuentes naturales de COV deben de jugar un papel importante en el proceso fotoquímico del ozono troposférico. Es por ello, que es necesario estudiar y analizar a través de una evaluación la producción de este contaminante secundario a partir de estas fuentes biogénicas, debido a los posibles cambios en la sensibilidad por las reducciones de los COV y NO_x de fuentes antropogénicas.

10.5.- Efecto de Fin de Semana (EFS) de O₃:

La prueba de hipótesis del análisis de comparación de las concentraciones diarias de O₃ nos indicó que, para los días de la semana y los fines de semana existe el mismo potencial de formación de ozono troposférico en la ciudad de Cuernavaca, Morelos, es decir, no existe una diferencia significativa para el mes de abril del año 2019, debido a que el valor-P fue mayor a 0.05 (0.91). De igual manera, para el 2020, el valor-P fue mayor a 0.05 (0.42), y también para 2021, el valor-P fue mayor a 0.05 (0.41). Ver figuras 37, 38 y 39.

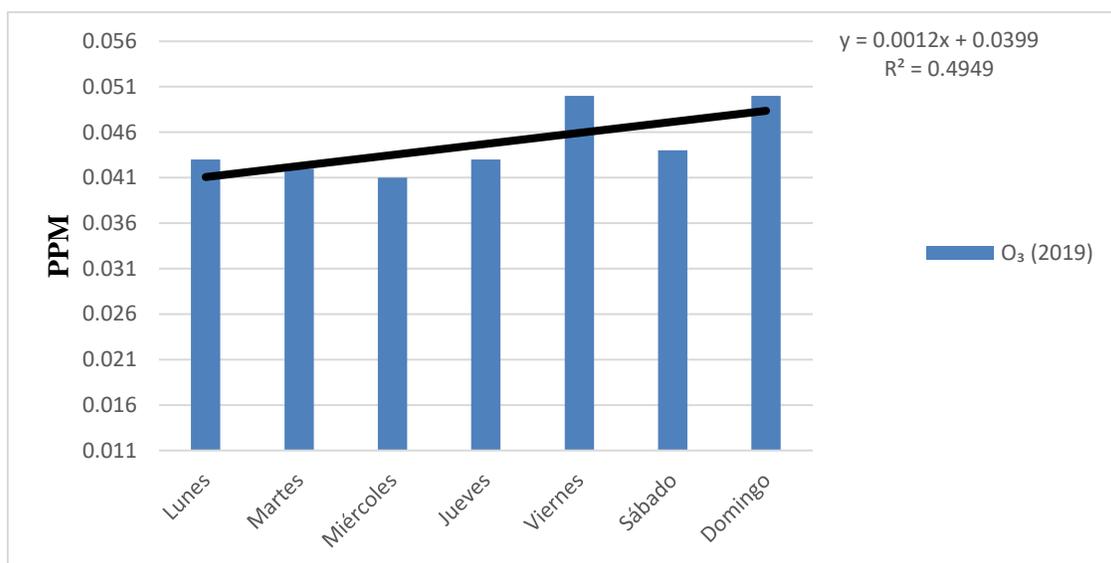


Figura 37. Comparación diaria de medias de las concentraciones de ozono 2019.

Los resultados pueden explicar que, a pesar de las reducciones en las emisiones de los NO_x durante el fin de semana, el ozono no disminuye significativamente, lo que nos indica que el área de estudio existe el mismo potencial de formación de ozono para todos los días de la semana, y que la ciudad de Cuernavaca se encuentra dentro de una región limitada por los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV).

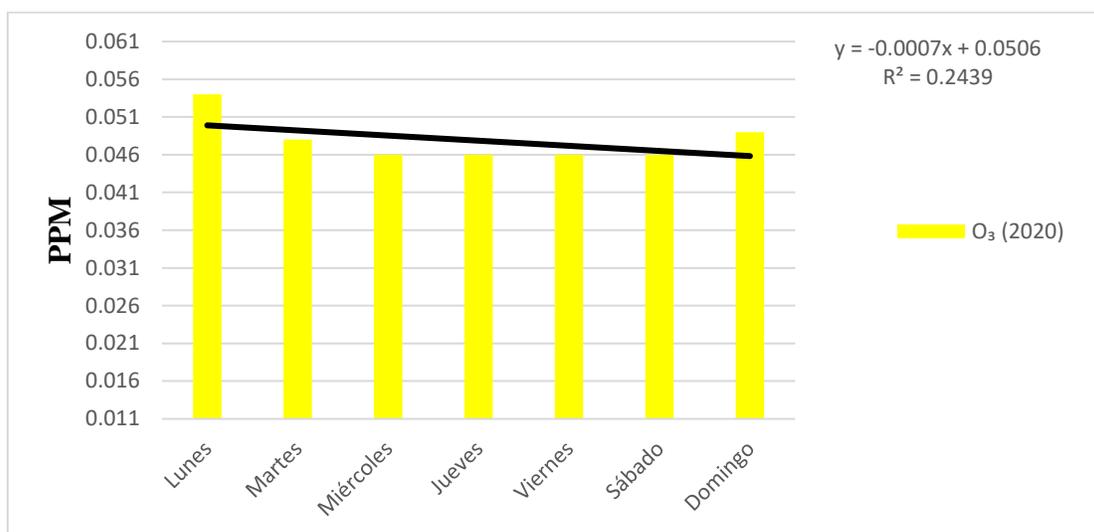


Figura 38. Comparación diaria de medias de las concentraciones de ozono 2020.

De acuerdo con los resultados de (Torres-Jardón, 2020), ha ocurrido algo de manera similar en los niveles de contaminación atmosférica en la ciudad de Cuernavaca, Morelos, en donde al parecer las disminuciones de contaminantes primarios tales como el óxido de nitrógeno, favoreció el aumento en las concentraciones de ozono troposférico debido a las emisiones continuas de Compuestos Orgánicos Volátiles, al igual que en otras ciudades, como, por ejemplo: China, Río de Janeiro y la Ciudad de México, señala (Torres-Jardón, 2020).

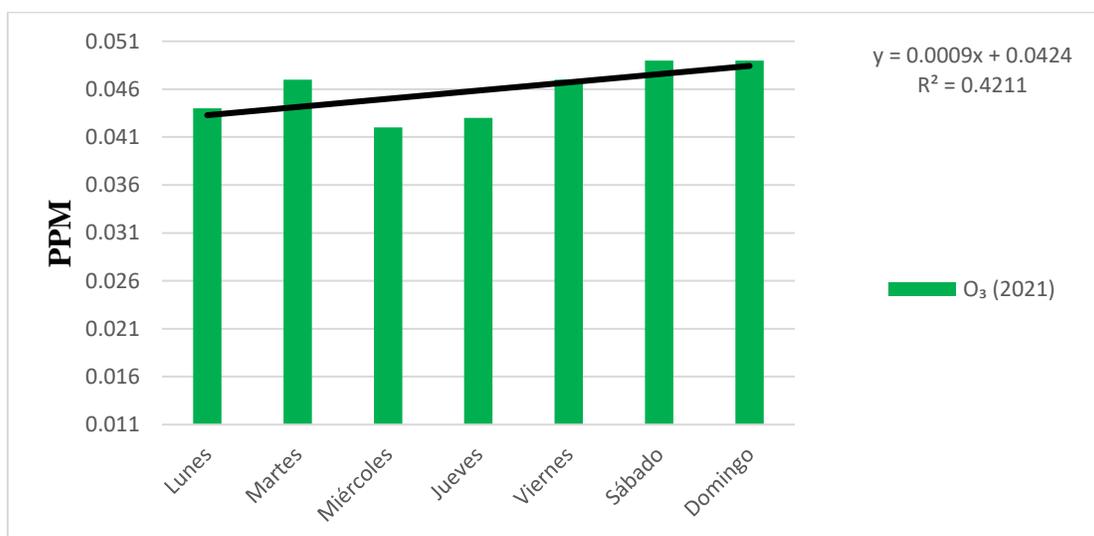


Figura 39. Comparación diaria de medias de las concentraciones de ozono 2021.

10.5.1. Efecto de Fin de Semana (EFS), para el NO₂:

La prueba de hipótesis de las concentraciones diarias de NO₂ para los días laborales con los días no laborales, indicó que, si hubo diferencia estadística significativa para el mes de abril del año 2019, debido a que el valor-P fue menor a 0.05 (0.005). De igual manera, para el 2020, el valor-P fue menor a 0.05 (0.002), y también para 2021, el valor-P fue mayor a 0.05 (0.003). Ver figuras 40, 41 y 42).

Asimismo, se observó que si hubo una reducción en los niveles ambientales de NO₂ para los fines de semana en comparación con los registros diarios en los días laborales para la zona de estudio en 2019 y 2021. Sin embargo, para las concentraciones registradas en el 2020, los niveles de NO₂ mostraron un patrón diferente durante el fin de semana en comparación con los días laborales, en este caso, se observó que las emisiones fueron mayores para el sábado y domingo.

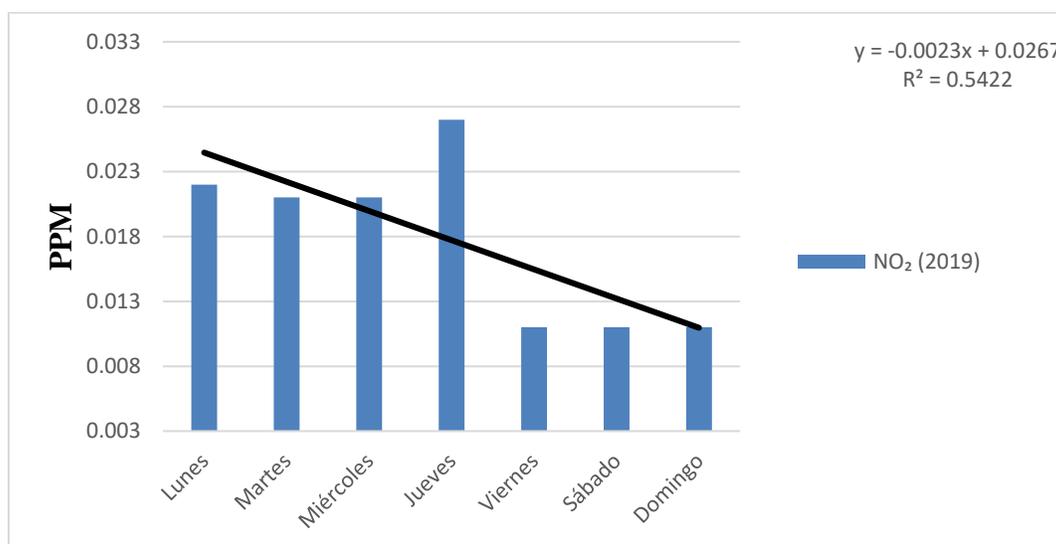


Figura 40. Comparación diaria de medias de las concentraciones de NO₂ para el año 2019.

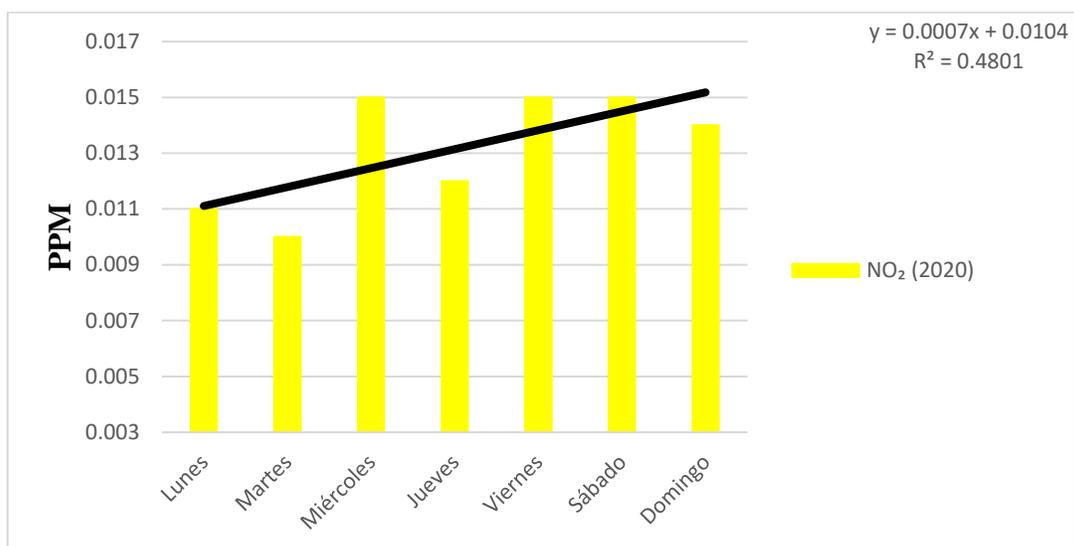


Figura 41. Comparación diaria de medias de las concentraciones de NO₂ para el año 2020.

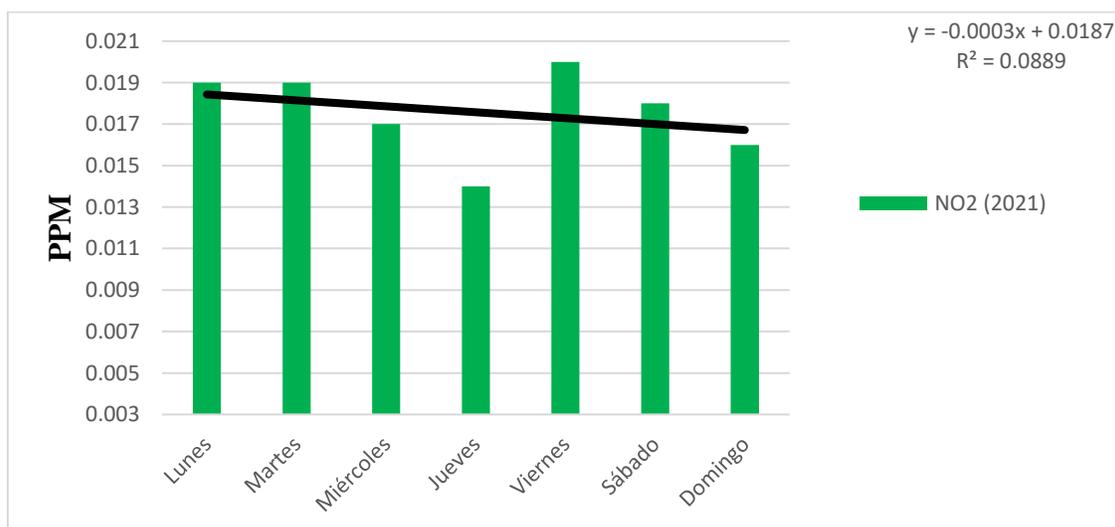


Figura 42. Comparación diaria de medias de las concentraciones de NO₂ para el año 2021.

10.6- Distribución espacial de las columnas promedio de NO₂:

A continuación, se presenta el análisis de las diferentes columnas promedio de NO₂, HCHO y CO para el año 2019, 2020 y 2021, respectivamente, para la ciudad de Cuernavaca, Morelos, mediante el uso de imágenes satelitales obtenidas por el instrumento de percepción remota TROPOMI abordo del satélite Sentinel-5P. Lo anterior, con la finalidad de identificar y cuantificar el porcentaje de reducción de los niveles de contaminación previamente al confinamiento por la pandemia, así como, durante el confinamiento y después de la emergencia sanitaria por el COVID-19, y determinar si hubo una mejoría en la calidad del aire en la zona de estudio.

Cabe señalar que, la implementación de la Jornada Nacional de Sana Distancia, que establecieron las autoridades de salud con el fin de reducir las actividades no esenciales por parte del sector público, privado y social durante el periodo del 23 de marzo al 30 de mayo del 2020, debido a la contingencia sanitaria del virus SARS-CoV2 (COVID-19), y posteriormente, el plan de la “nueva normalidad”, que incluía el retorno parcial de algunos sectores de actividades, permitió reducir las emisiones a la atmósfera de las principales actividades económicas del país, por lo que los niveles de contaminación se redujeron ampliamente en muchas ciudades del país.

En ese sentido, se observó que, la distribución espacial de la columna promedio de NO₂ previo al confinamiento por el COVID-19 en la ciudad de Cuernavaca, Morelos, en el periodo de marzo a mayo del 2019, se reportó una densidad de moléculas entre 83 y 88 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$. Esto se debe a que el NO₂ es un contaminante generado por la quema de combustibles fósiles por parte del parque vehicular, aunado a la quema de otros combustibles en el sector industrial y en la combustión doméstica, tal y como lo describe Peralta et al (2021). Sin embargo, en la parte noroeste del municipio se presentaron concentraciones iguales a la zona urbana, por lo que, se esperaría que la presencia de este gas se deba a los incendios forestales y/o quemas agrícolas, o al transporte de contaminantes de otras zonas.

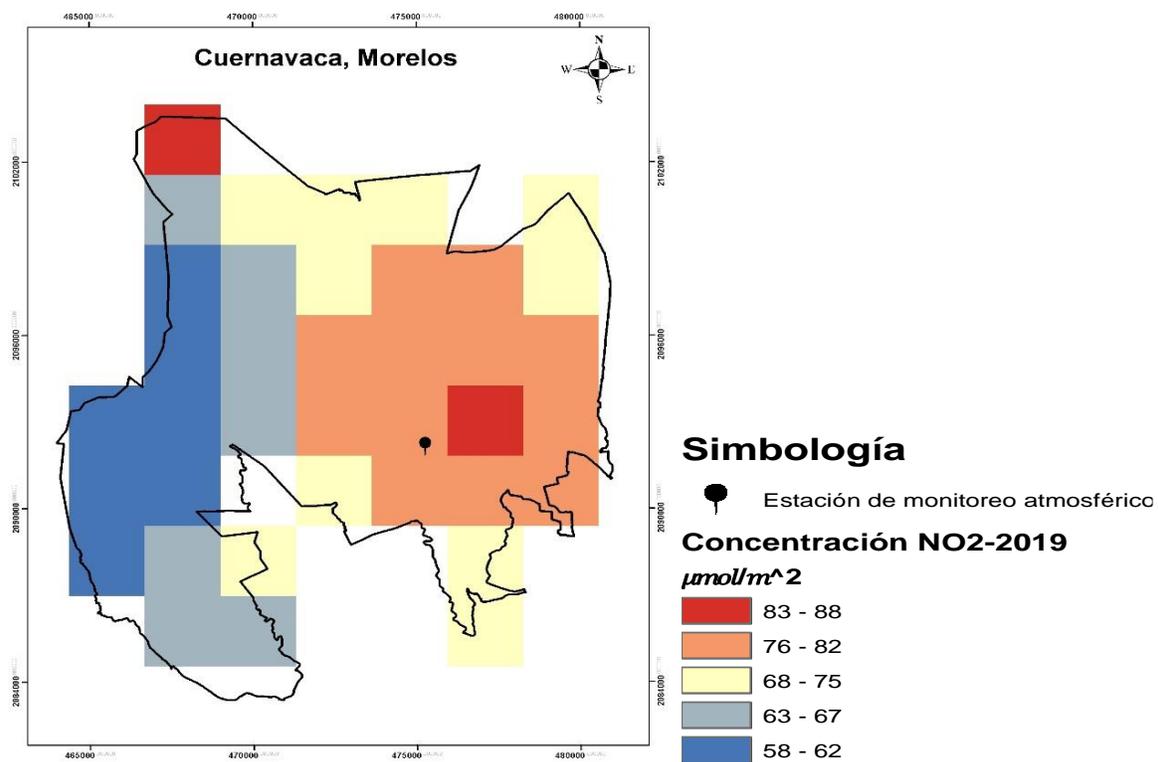


Figura 43. Distribución espacial de las columnas promedio de NO₂ para el periodo de marzo a mayo del 2019.

Una vez implementada la Jornada Nacional de Sana Distancia que señalaba la suspensión de actividades no esenciales durante el periodo del 23 de marzo al 30 de mayo del año 2020, se observó la reducción de moléculas de la columna de NO_2 en la ciudad oscilando entre 56 y 62 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$, lo que representó una disminución del 30 % en comparación con el 2019. De igual manera, en la parte noreste se reportan concentraciones similares a las de la zona urbana, se debe principalmente a las quemas agrícolas e incendios forestales, así como también, en la zona norte del municipio, se presentan concentraciones altas como en la zona urbana, puede deberse a emisiones por fuentes naturales y al aumento de emisiones de fuentes domésticas. De acuerdo con el INECC (2022), este comportamiento se debe a la reducción de emisiones a la atmósfera, como resultado de las restricciones en la movilidad del parque vehicular y la suspensión de actividades en el sector industrial, lo cual ha sido observado en muchas ciudades del mundo (ver figura 40).

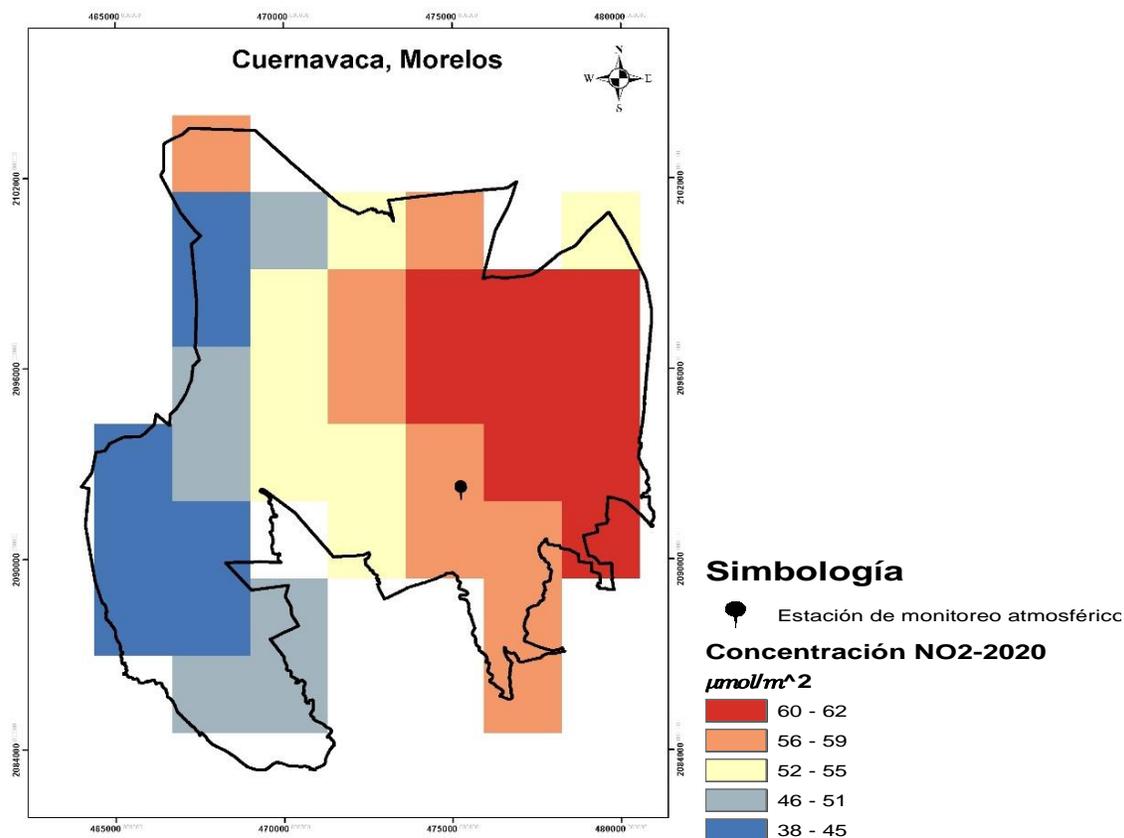


Figura 44. Distribución espacial de las columnas promedio de NO_2 para el periodo de marzo a mayo del 2020.

El diagnóstico de evaluación durante la implementación de la nueva normalidad, el cual constaba de la reapertura parcial de algunas actividades, por ejemplo, la circulación vehicular, la operación de centros comerciales, y las diversas actividades industriales, ocasionaron nuevamente el aumento de los niveles ambientales de este contaminante, por ejemplo, los valores oscilaron entre 74 y 80 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ para la zona centro y al este de Cuernavaca cerca del Centro Industrializado del Valle de Cuernavaca (CIVAC), esto representó un aumento del 29 % en la densidad de moléculas de la columna promedio de NO_2 para el año 2021 en comparación con el año anterior (ver figura 41). De igual manera, los niveles ambientales de NO_2 medidos en superficie terrestre, al igual que otros contaminantes criterio reportaron un aumento durante la nueva normalidad.

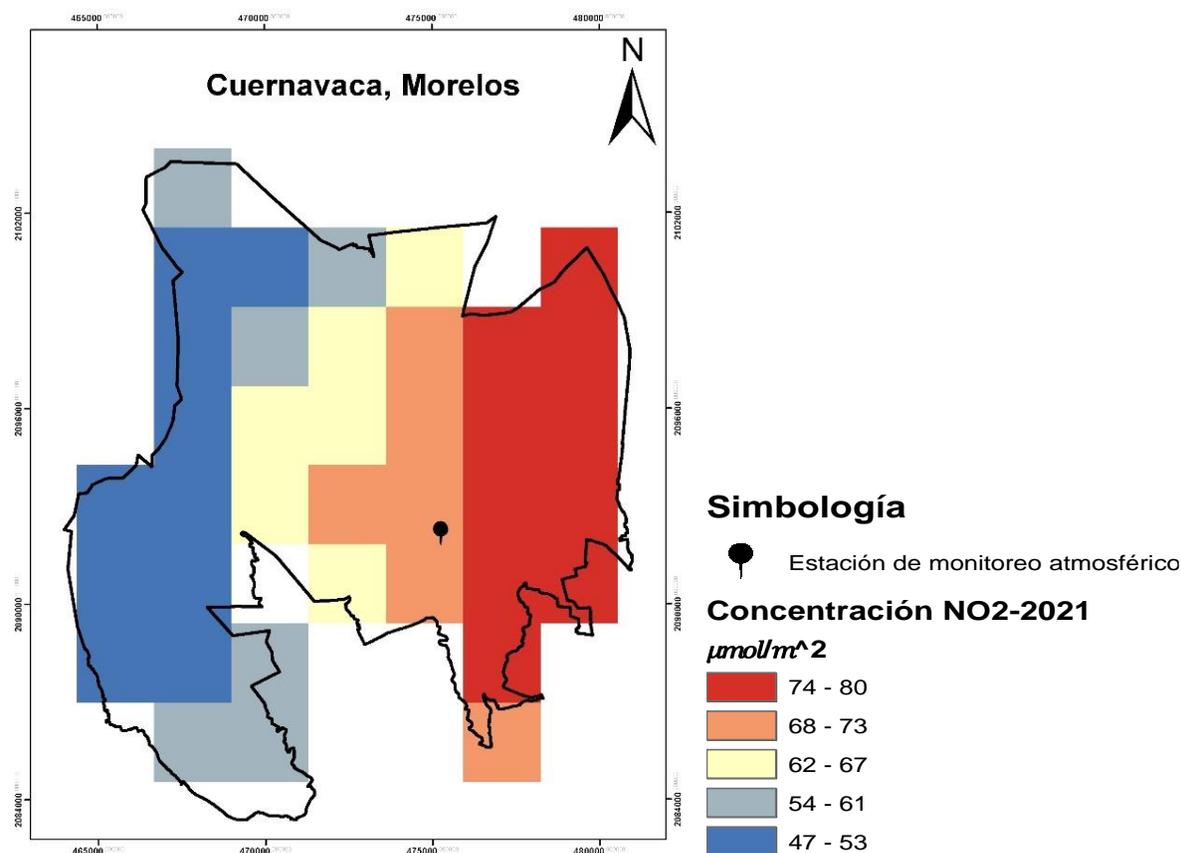


Figura 45. Distribución espacial de las columnas promedio de NO_2 para el periodo de marzo a mayo del 2021.

10.7- Distribución espacial de las columnas promedio de HCHO:

En ese mismo sentido, se realizó el monitoreo ambiental de la columna promedio de formaldehído (HCHO), para la zona centro y el área urbana de la ciudad, se obtuvo una densidad de moléculas entre 98 hasta 280 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ durante el periodo de marzo a mayo en 2019. Sin embargo, durante este mismo periodo gran parte del municipio de Cuernavaca no se obtuvieron registros del contaminante por parte del satélite Sentinel-5P, debido a la nubosidad, lo que dificultó continuar con el análisis satelital.

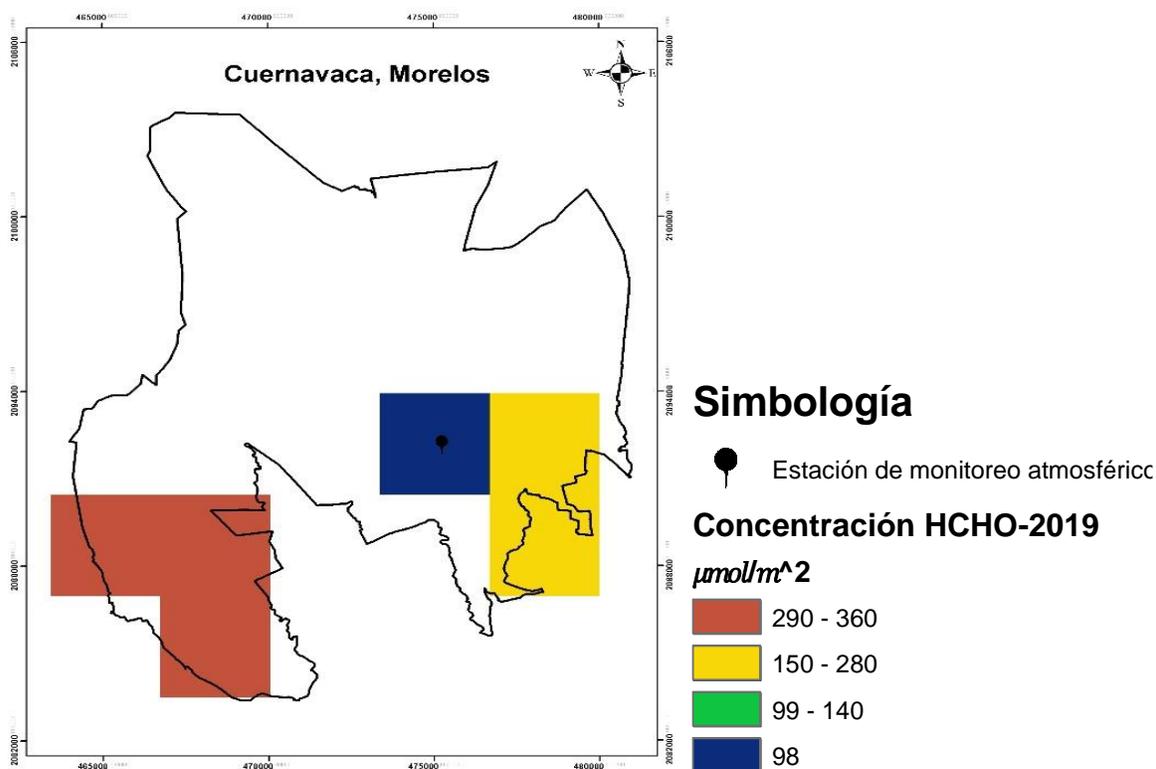


Figura 46. Distribución espacial de las columnas promedio de HCHO para el periodo de marzo a mayo del 2019.

En 2020, se observó un aumento del HCHO para la zona centro y área urbana de la ciudad. Los valores se situaron entre los 160 y 300 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$. Esto representó un aumento del 7 % en la distribución espacial de este contaminante en comparación con el año 2019. Lo anterior, debido al aumento en las emisiones de gas L.P. debido a la combustión doméstica durante el periodo de confinamiento de marzo a mayo, así como también, por otras fuentes de área, como el manejo y distribución de gas y el uso doméstico de solventes de limpieza. Asimismo, de acuerdo con los registros de la estación de monitoreo de la ciudad de Cuernavaca, el ozono troposférico aumentó un 10 % para el año 2020, por lo que al disminuir las emisiones de NO_x del parque vehicular, los COV son los mayores precursores de este gas secundario. El INECC (2022), reportó un aumento de este contaminante durante el mismo periodo para el estado de Hidalgo.

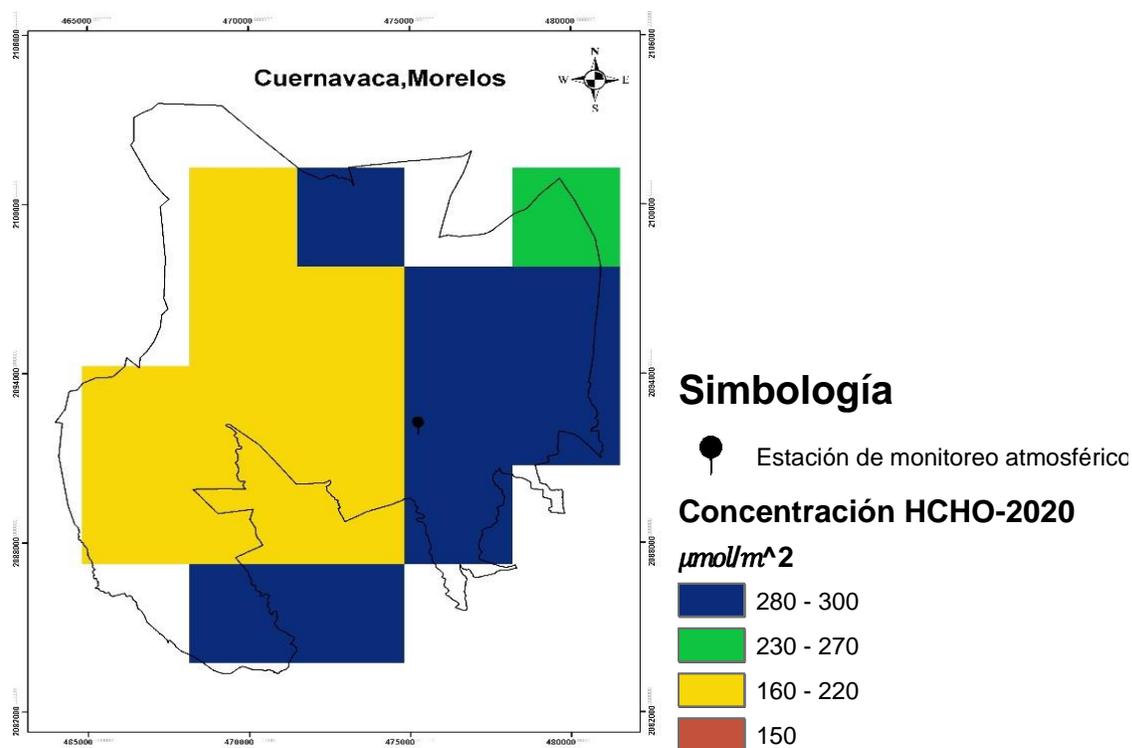


Figura 47. Distribución espacial de las columnas promedio de HCHO para el periodo de marzo a mayo del 2020.

Adicionalmente, y con el objetivo de seguir evaluando el fenómeno atípico del confinamiento por el COVID-19, se realizó el diagnóstico del HCHO durante la reapertura parcial y total de algunos sectores económicos del sector industrial y comercial dentro del área de estudio, por lo que, se obtuvo nuevamente el promedio de la densidad de moléculas en la columna de HCHO de $220 \mu\text{mol}/\text{m}^2$, lo que representó una disminución del 30 % en comparación con el año 2020. Lo anterior, puede relacionar con el aumento de emisiones de NO_x principalmente por fuentes vehiculares y por el aumento de actividades de fuentes fijas. Sin embargo, en el lado este cerca de la zona de CIVAC, los valores se situaron entre los $220 - 300 \mu\text{mol}/\text{m}^2$, lo que indica que no hubo una disminución significativa del HCHO en esa área.

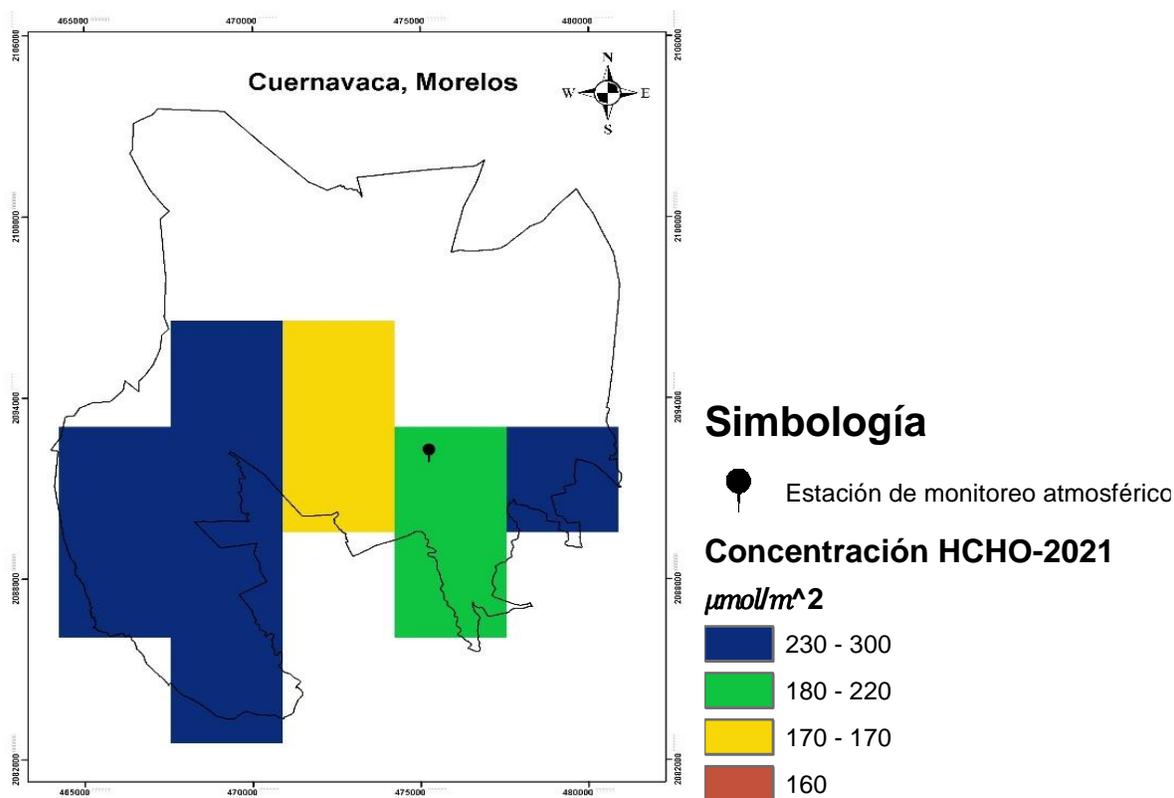


Figura 48. Distribución espacial de las columnas promedio de HCHO para el periodo de marzo a mayo del 2021.

10.8- Distribución espacial de las columnas promedio de CO:

La siguiente imagen satelital muestra la columna promedio de CO para el año 2019, en la cual se observa una densidad máxima entre 140 y 150 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ para el área centro y el lado este de la ciudad de Cuernavaca. De acuerdo con Maldonado Pacheco et al, (2020), el monóxido de carbono es un importante gas indicador para áreas altamente contaminadas. Asimismo, con base en el inventario de emisiones del estado de Morelos (2014), el CO proviene principalmente de las fuentes móviles carreteras, seguido de fuentes domésticas (por el uso de leña), y en menor proporción por las quemas agrícolas e incendios forestales. En la figura 45, se puede observar que los mayores niveles de CO se presentan sobre las principales avenidas de la ciudad, y sobre el paso express (autopista del sol), asimismo, se presentan muy cerca del boulevard Cuauhnáhuac de la Ciudad Industrializada del Valle de Cuernavaca (CIVAC). Sin embargo, del lado oeste de la ciudad, las concentraciones pueden originarse por la quema agrícola e incendios forestales.

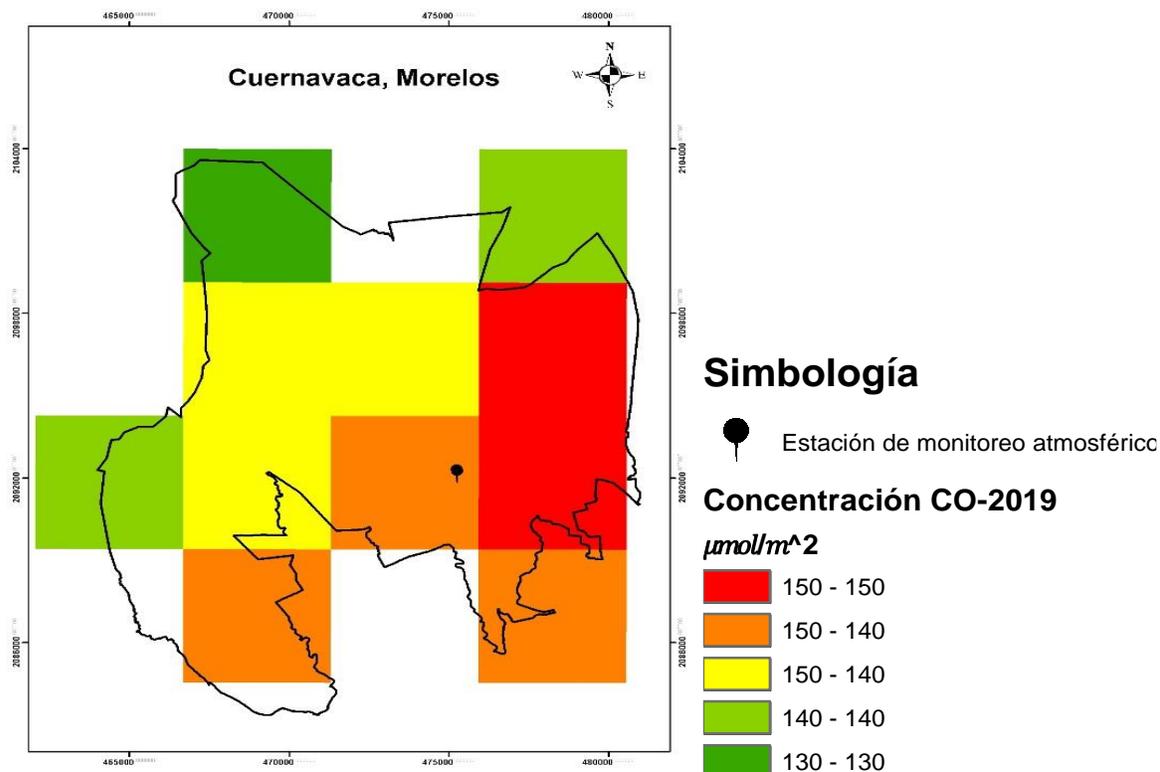


Figura 49. Distribución espacial de las columnas promedio de CO para el periodo de marzo a mayo del 2019.

En ese mismo sentido, el diagnóstico de la evaluación de la distribución espacial de la columna promedio de CO durante el confinamiento temporal por la emergencia sanitaria por el virus SARS-CoV2 (COVID-19), la concentración espacial de CO registrada para el año 2020 disminuyó del 20 % en comparación con los datos reportados para el 2019. Los niveles ambientales de este contaminante oscilaron entre 110 a 120 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ para el área centro y lado este de la ciudad de Cuernavaca (ver figura 46). Lo anterior, se puede explicar debido a la disminución de emisiones de CO por parte de la circulación de vehículos de carretera, principalmente por autos particulares y pickup o camionetas de uso particular con base en el inventario de emisiones para el estado de Morelos (2014). Sin embargo, durante este periodo de cero moviidades, las emisiones por vehículos pesados (diésel), así como, por motocicletas siguieron generándose en menos escala, debido al transporte público y al suministro de alimentos. De igual forma, las quemas agrícolas e incendios forestales continuaron emitiendo CO a la atmósfera.

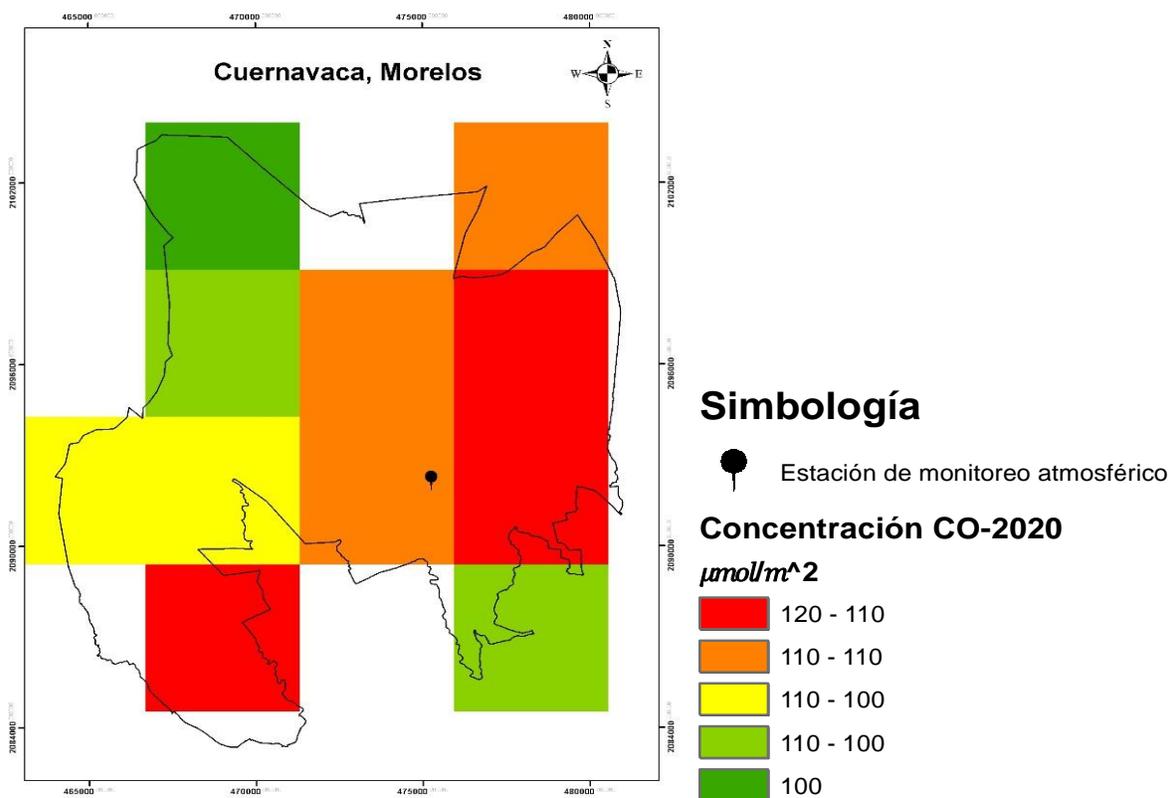


Figura 50. Distribución espacial de las columnas promedio de CO para el periodo de marzo a mayo del 2020.

Posteriormente, durante la reapertura parcial de algunas actividades sociales públicas y privadas durante el año 2021, se observó un aumento del 19 % de la distribución espacial de las columnas promedio de CO en comparación con el año anterior (2020). Para este periodo, los datos registrados oscilaron nuevamente entre 140 a 150 $\mu\text{mol}/\text{m}^2$ para la zona centro de la ciudad, y principalmente sobre el área urbana y las principales vías de comunicación (autopista del Sol, el Boulevard Cuauhnáhuac y Plan de Ayala), así como, cerca del parque industrial denominado Ciudad Industrializada del Valle de Cuernavaca (CIVAC). Lo anterior, puede deberse al aumento considerable en la movilidad vehicular, principalmente por los autos y camionetas particulares, asimismo, por la combustión doméstica de leña y el aumento de producción en los sectores industriales, aunado, a los múltiples incendios forestales presentados en el municipio y las quemas agrícolas. Según el inventario de emisiones para Morelos (2014), el sector comercial contribuye también en la generación de emisiones de CO.

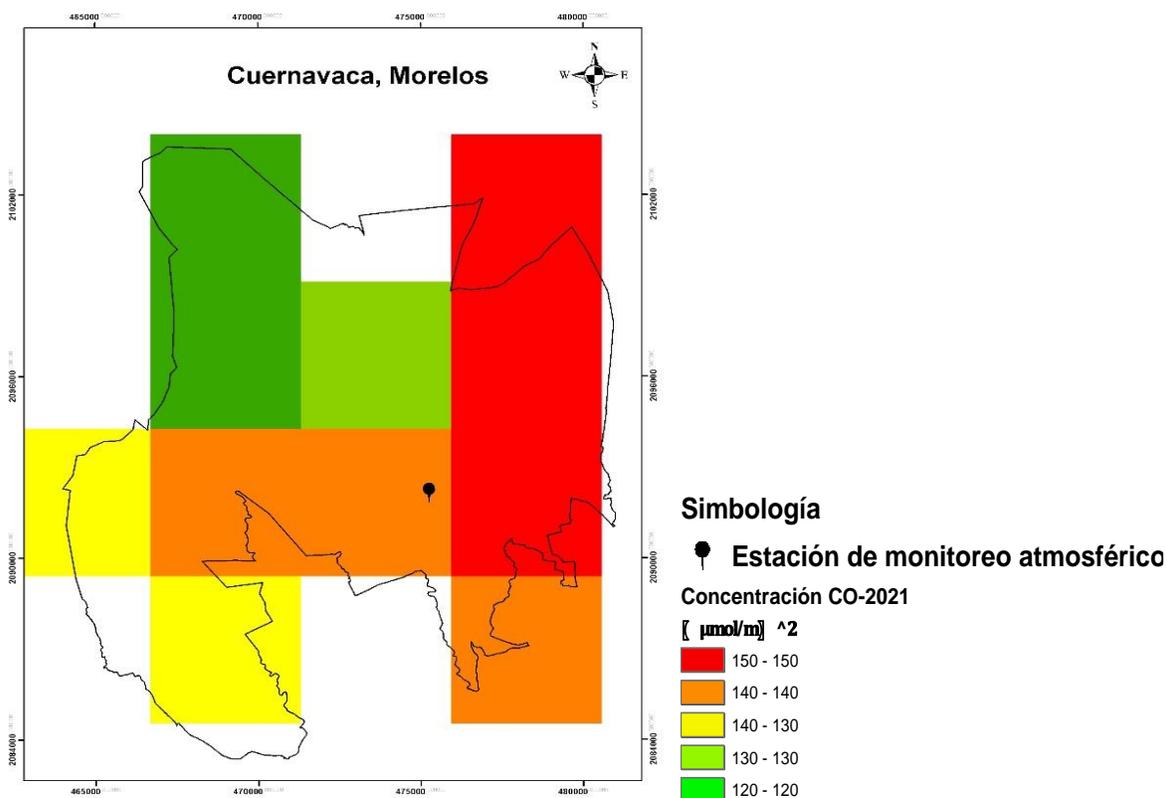


Figura 51. Distribución espacial de las columnas promedio de CO para el periodo de marzo a mayo del 2021.

10.9-Modelación con Isopletras: Herramienta para la gestión de la calidad del aire:

Para el diseño de los diagramas de las isopletras, se seleccionaron los datos horarios (06:00-09:00 am) de la calidad del aire del 18 al 24 de mayo del 2020 de la ciudad de Cuernavaca, Morelos. La información de estos parámetros fue generada en la Estación Cuernavaca 01, SINAICA: <https://sinaica.inecc.gob.mx/> .

Es importante mencionar que, este periodo se seleccionó debido a que en esos días se presentaron las concentraciones diarias más altas de ozono y donde las restricciones de movilidad por la emergencia sanitaria del COVID-19 continuaron siendo estrictas por parte de las autoridades del sector salud. Por lo que, este escenario se caracterizó por la reducción de emisiones de NO_x por la baja circulación vehicular, y el aumento considerado del gas L.P. en los hogares por el confinamiento.

De acuerdo con Jaimes (2017), la relación de COV/NO_x es importante para la gestión de la calidad del aire, a través de la elaboración de estrategias de control utilizando isopletras. Asimismo, también menciona que, si la relación COV/NO_x es baja, por ejemplo, menor a 8 se considera como una región limitada por los COV. Estos autores (Jaimes, 2017; y Peralta et al 2020), también señalan que la reducción de las emisiones de COV en zonas urbanas tiene un impacto más eficiente en las concentraciones ambientales de ozono troposférico, de igual manera, indican que, la reducción de las emisiones de NO_x provocan el incremento de las concentraciones ambientales de este gas secundario, por lo que, no es considerado como una estrategia de control efectiva.

Por otra parte, señala que este método puede tener cierto grado de incertidumbre, debido a varios factores, por ejemplo, el procesamiento de los datos atmosféricos, el error del cálculo de los inventarios de emisiones, la simulación del modelo solo aplica para un día, asimismo, la relación ambiental de COV/NO_x puede variar espacial y temporalmente de un sitio a otro.

Sin embargo, al no contar con datos disponibles de los contaminantes atmosféricos de los COV y NO_x, se utilizaron las mediciones atmosféricas de CO y NO₂ como sustitutos para estudiar la relación COV/NO_x en Cuernavaca, Morelos. Esto puede tener un mayor grado

de incertidumbre en la identificación del régimen fotoquímico de formación de ozono troposférico. Por lo que, es necesario contar con mediciones continuas de los gases precursores de este contaminante secundario para dar mayor certeza en la identificación del régimen de formación.

A continuación, se presentan los diagramas de las isopletras para cada día de análisis:

Por ejemplo, los datos que se utilizaron para el 18 de mayo del 2020 fueron ($\text{CO}=0.86$ ppm, $\text{O}_3=0.055$ ppm, $\text{NO}_2=0.37$ ppm). Los resultados de la simulación muestran que, la relación COV/NO_x de los datos fue de 7.1, por lo que, con esta relación se puede identificar que la zona estuvo dentro del régimen limitado por los COV. De igual manera, la isopletra indica que, la concentración de los gases precursores no deberá de ser mayor a 1.2 ppm para no aumentar la concentración de ozono en la zona de estudio.

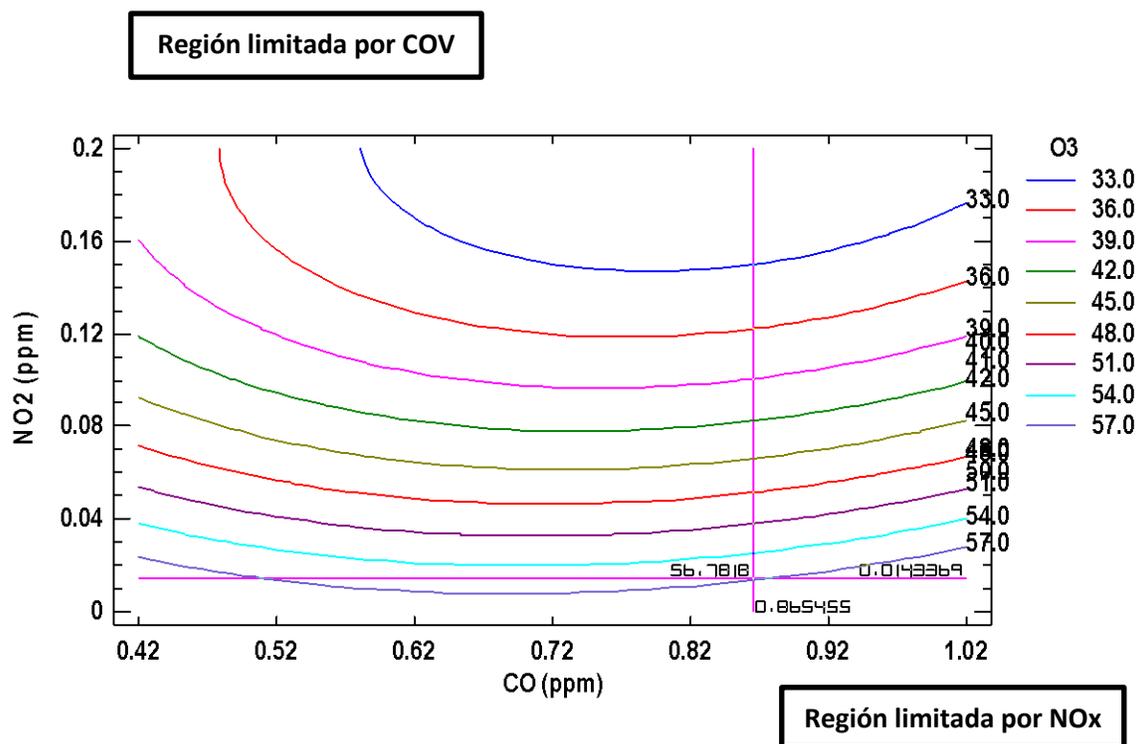


Figura 52. Representación bidimensional del diagrama de Isopletras como estrategia de control para la formación de O_3 durante el 18 de mayo del 2020.

Para el día 19 de mayo del 2020, los datos que se utilizaron fueron ($\text{CO}=0.77$ ppm, $\text{O}_3=0.052$ ppm, $\text{NO}_2=0.12$ ppm). Los resultados de la simulación muestran que, la relación COV/NO_x es de 6.4, por lo que, con esta relación se puede identificar que la zona estuvo dentro del área limitada por los COV. De igual manera, la isopleta indica que, la concentración de los gases precursores no deberá de ser mayor a 1.0 ppm para no aumentar la concentración de ozono en la zona de estudio.

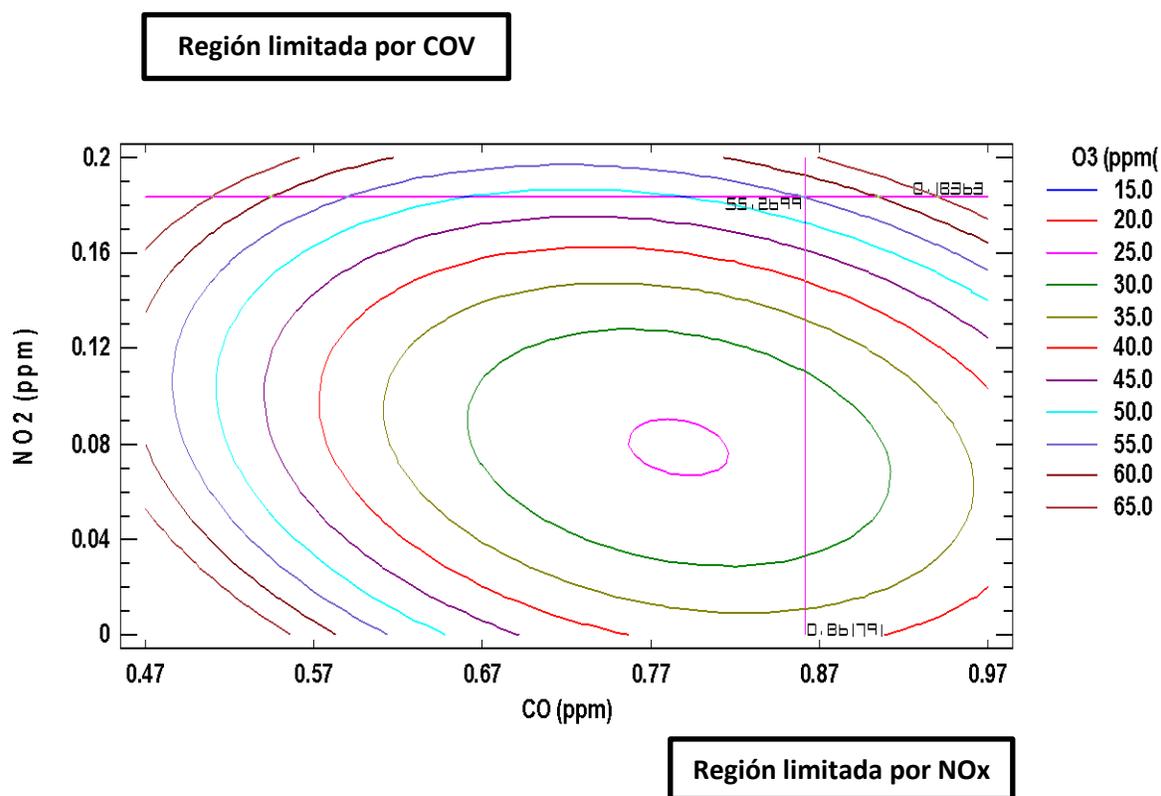


Figura 53. Representación bidimensional del diagrama de Isopletas como estrategia de control para la formación de O_3 durante el 19 de mayo del 2020.

Por su parte, los datos utilizados para el día 20 de mayo del 2020, fueron ($\text{CO}=1.15$ ppm, $\text{O}_3=0.061$ ppm, $\text{NO}_2=0.18$ ppm). Los resultados de la simulación muestran que, la relación COV/NO_x es de 6.3, por lo que, con esta relación se puede identificar que la zona estuvo en el área limitada por los COV. De igual manera, la isopleta indica que, la concentración de los gases precursores no deberá de ser mayor a 1.0 ppm para no aumentar la concentración de ozono en la zona de estudio.

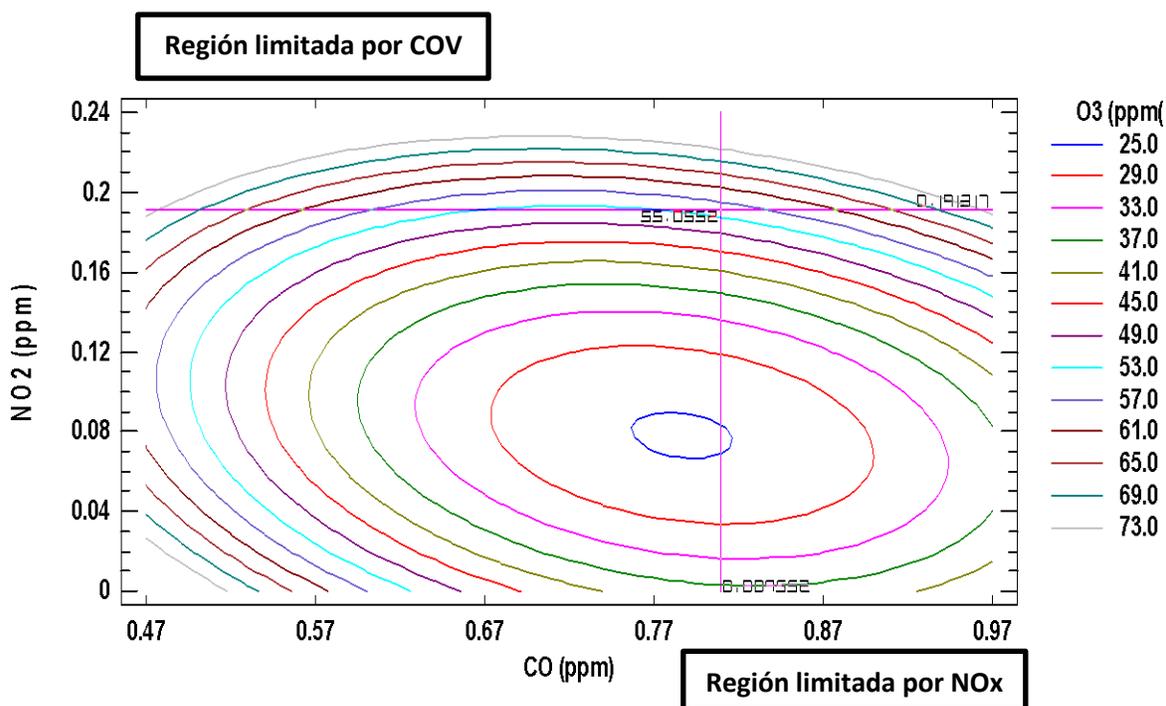


Figura 54. Representación bidimensional del diagrama de Isopletas como estrategia de control para la formación de O_3 durante el 20 de mayo del 2020.

Para el día 21 de mayo del 2020, los datos que se utilizaron para realizar la representación bidimensional fueron ($\text{CO}=1.21$ ppm, $\text{O}_3=0.063$ ppm, $\text{NO}_2=0.20$ ppm). Los resultados de la simulación muestran que, la relación COV/NO_x es de 6.05, por lo que, con esta relación se puede identificar que la zona estuvo en la región limitada por los COV. De igual manera, la isopleta indica que, la concentración de los gases precursores no deberá de ser mayor a 1.0 ppm para no aumentar la concentración de ozono en la zona de estudio.

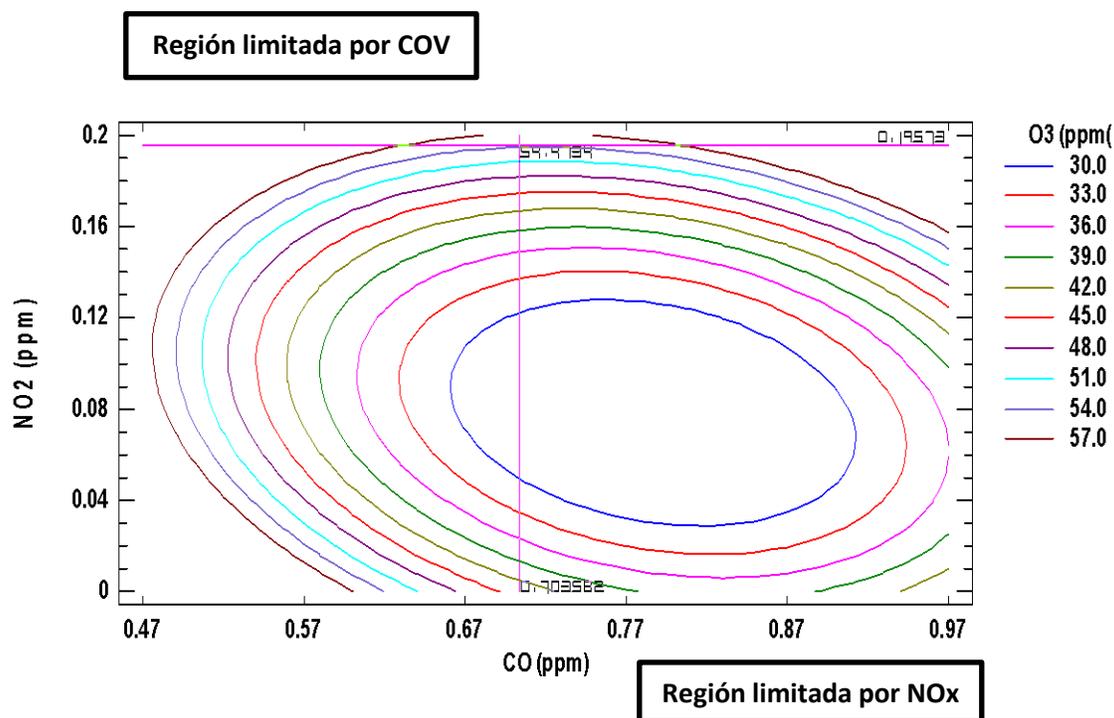


Figura 55. Representación bidimensional del diagrama de Isopletas como estrategia de control para la formación de O_3 durante el 21 de mayo del 2020.

De igual manera, para el día 22 de mayo del 2020, los datos que se utilizaron para realizar la representación bidimensional fueron ($\text{CO}=0.98$ ppm, $\text{O}_3=0.055$ ppm, $\text{NO}_2=0.14$ ppm). Los resultados de la simulación muestran que, la relación COV/NO_x es de 7, por lo que, con esta relación se puede identificar que la zona estuvo dentro del área limitada por los COV. De igual manera, la isopleta indica que, la concentración de los gases precursores no deberá de ser mayor a 1.0 ppm para no aumentar la concentración de ozono en la zona de estudio.

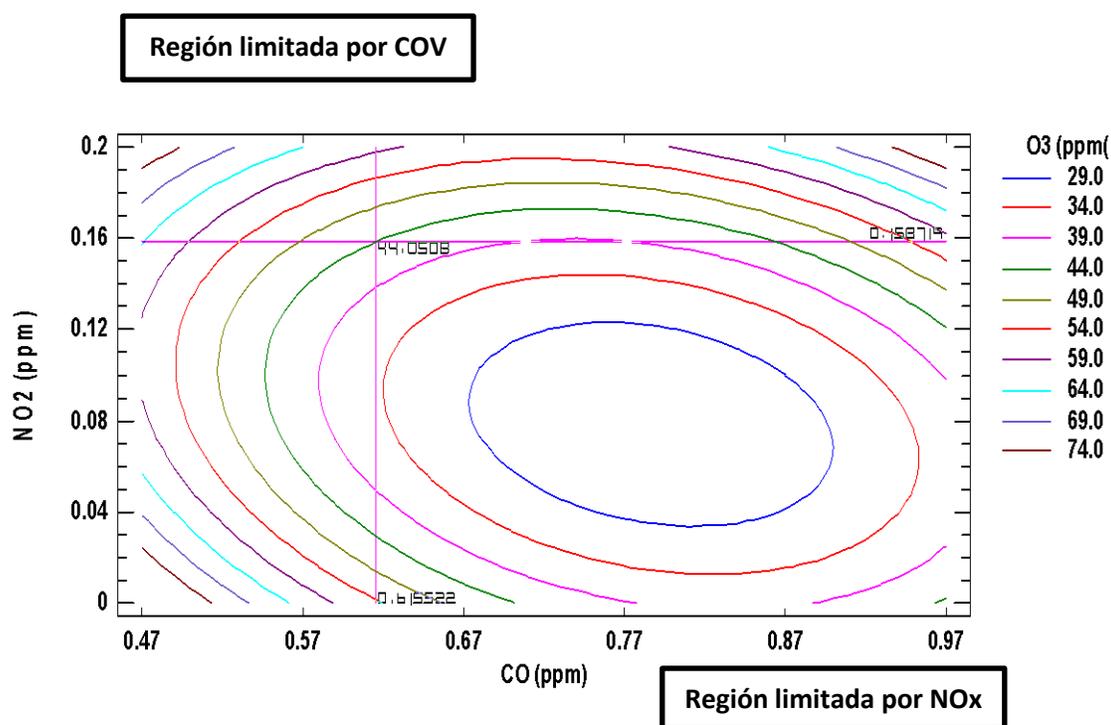


Figura 56. Representación bidimensional del diagrama de Isopletas como estrategia de control para la formación de O_3 durante el 22 de mayo del 2020.

Los datos que se utilizaron para diseñar la isopleta para el día 23 de mayo del 2020, fueron ($\text{CO}=0.87$ ppm, $\text{O}_3=0.049$ ppm, $\text{NO}_2=0.13$ ppm). Los resultados de la simulación muestran que, la relación COV/NO_x es de 6.7, por lo que, con esta relación se puede identificar que la zona estuvo dentro de la región limitada por los COV. De igual manera, la isopleta indica que, la concentración de los gases precursores no deberá de ser mayor a 1.0 ppm para no aumentar la concentración de ozono en la zona de estudio.

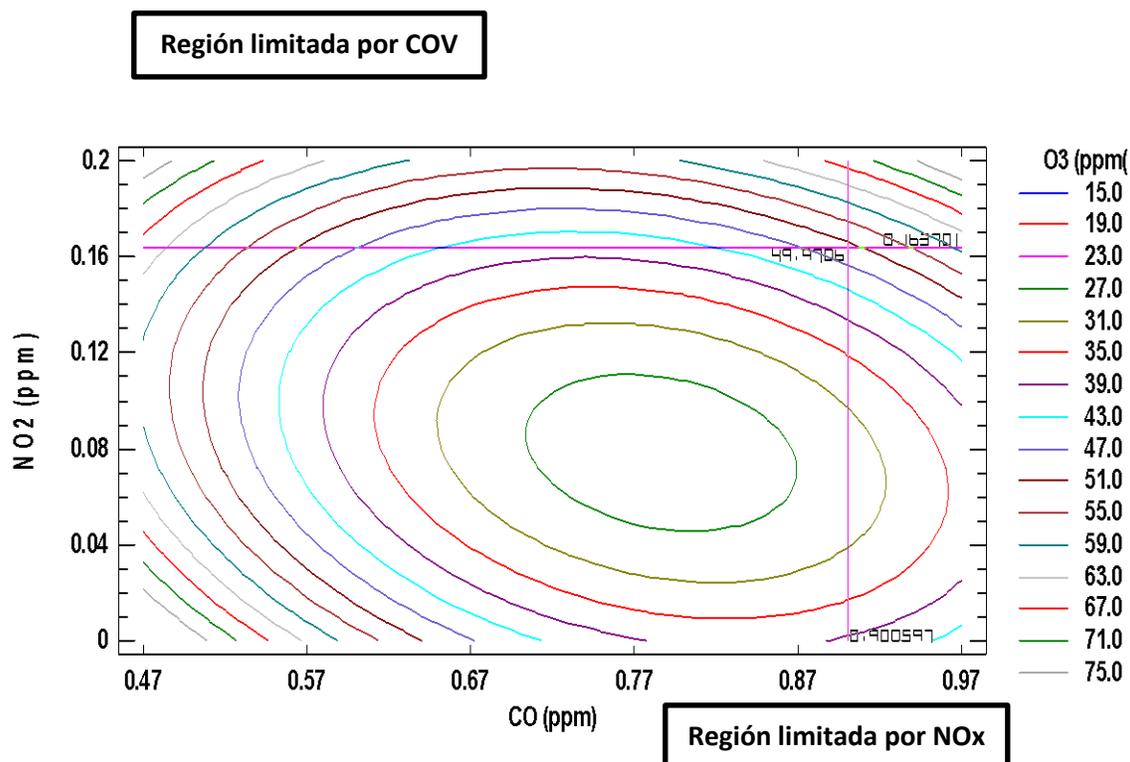


Figura 57. Representación bidimensional del diagrama de Isopletas como estrategia de control para la formación de O_3 durante el 23 de mayo del 2020.

Por último, para el día 24 de mayo del 2020, los datos que se utilizaron para realizar la representación bidimensional fueron ($\text{CO}=0.80$ ppm, $\text{O}_3=0.045$ ppm, $\text{NO}_2=0.08$ ppm). Los resultados de la simulación muestran que, la relación COV/NO_x es de 10, por lo que, con esta relación se puede identificar que la zona estuvo en una región limitada por los NO_x . De igual manera, la isopleta indica que, la concentración de los gases precursores no deberá de ser mayor a 1.0 ppm para no aumentar la concentración de ozono en la zona de estudio.

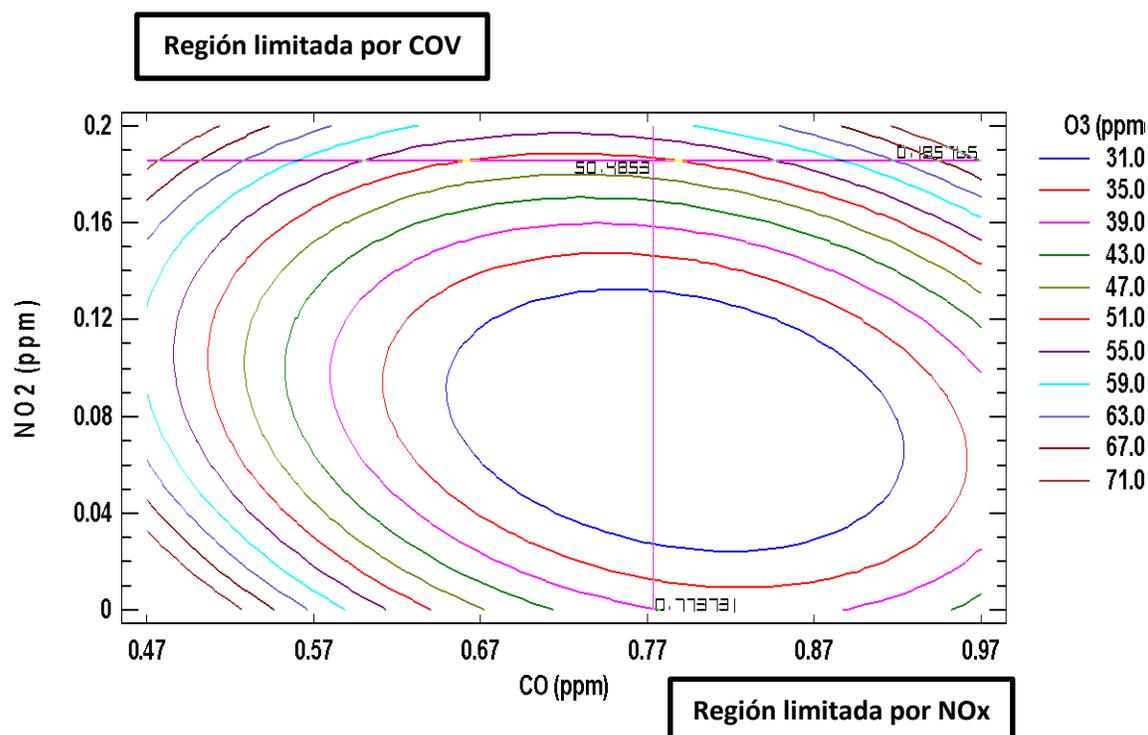


Figura 58. Representación bidimensional del diagrama de Isopletas como estrategia de control para la formación de O_3 durante el 24 de mayo del 2020.

La elaboración de isopletas son de gran utilidad para los tomadores de decisiones, porque permite conocer las implicaciones de esta sobre las medidas de estrategias de control, a través del análisis de la química atmosférica de los gases que participan en la formación del ozono troposférico. Cabe señalar, que la relación de COV/NO_x no se puede considerar igual para toda la zona urbana, debido a que esta puede variar significativamente, y depende de las fuentes de emisiones más cercanas, el tipo de transporte y la temporada del año, por lo que, proponer el uso de diagramas de isopletas para toda una zona metropolitana puede resultar ineficiente.

11.- CONCLUSIONES

En la ciudad de Cuernavaca, Morelos, durante el cierre temporal por la contingencia sanitaria del COVID-19, la concentración ambiental de O_3 tuvo una diferencia significativa en comparación con el año anterior, y una diferencia porcentual del 14 % con respecto al promedio anual del 2019, a pesar de la reducción de emisiones de gases contaminantes. Asimismo, se comprobó que, se siguen rebasando en más de una ocasión el valor promedio horario y el valor promedio diario para el ozono troposférico, por lo que, se incumple con lo establecido en la NOM-020-SSA1-2014.

En cuanto al fenómeno por el Efecto de Fin de Semana, el resultado indicó que, no hubo un cambio significativo en las concentraciones ambientales de O_3 entre los días laborales y los fines de semana para el mes de abril, es decir, existió el mismo potencial de formación de ozono troposférico en la ciudad, para el año 2019, debido a que el valor-P fue mayor a 0.05 (0.91). Lo mismo ocurrió para el 2020, el valor-P fue mayor a 0.05 (0.42), y también para 2021, el valor-P fue mayor a 0.05 (0.41).

Asimismo, lo anterior es sustentado con el análisis de Efecto de Fin de Semana de las concentraciones diarias de NO_2 entre los días laborales y los días no laborales, el cual indicó que, si hubo diferencia estadística significativa para el mes de abril del año 2019, debido a que el valor-P fue menor a 0.05 (0.005). De igual manera, para el 2020, el valor-P fue menor a 0.05 (0.002), y también para 2021, el valor-P fue mayor a 0.05 (0.003).

De igual manera, la concentración ambiental de PM_{10} y $PM_{2.5}$ en la zona de estudio, presentó una fuerte asociación con el ozono troposférico en 2019, 2020 y 2021, lo que sugiere que existe formación secundaria entre ambos contaminantes, y que comparten la misma fuente de origen. En ese mismo sentido, las principales fuentes de emisión de los NO_x y los COV proviene del tráfico vehicular, el consumo doméstico de gas L.P., el manejo y distribución del gas L.P., el sector industrial, las emisiones evaporativas, el uso doméstico de solventes de limpieza, los incendios forestales y las quemadas agrícolas.

Durante el análisis de temporadas, se observó que, en la estación seca – cálida, se presentaron las concentraciones más altas de ozono troposférico en la ciudad de

Cuernavaca, Morelos, esto puede explicarse, debido a la baja velocidad del viento, las altas temperaturas, y a la poca nubosidad presente en la atmósfera, permitiendo así, que los gases primarios se acumulen en la troposfera inferior e interactúen entre sí generando reacciones fotoquímicas. En la temporada de lluvias, se presentaron las concentraciones más bajas de ozono, debido a que la velocidad del viento aumenta y la radiación solar disminuye, favoreciendo la dispersión de los contaminantes por la inestabilidad atmosférica, y/o la eliminación de estos por acción de la precipitación pluvial. Para la época de otoño e invierno, se observó que las concentraciones ambientales de ozono tuvieron un repunte, esto puede atribuirse a la baja velocidad del viento y a la ausencia de precipitación en la zona de estudio.

Asimismo, la utilización de la información satelital de Sentinel-5P permitió identificar la reducción o disminución de los niveles ambientales de los contaminantes atmosféricos y de la densidad de moléculas en la columna satelital durante el periodo de marzo a mayo para el año 2019, 2020 y 2021, respectivamente. Para el confinamiento temporal por el COVID-19, se observaron cambios en las concentraciones de NO_2 , HCHO y CO durante el año 2020. Por ejemplo, para el NO_2 y el CO, se estimó una reducción del 20 % para cada uno de estos gases en comparación con el año anterior, debido a la reducción de la movilidad vehicular. Por otra parte, el nivel ambiental de HCHO tuvo un aumento del 206 % en comparación con el 2019, esto puede deberse al aumento en el uso doméstico de solventes de limpieza, así como, por el uso doméstico de gas L.P., y a las emisiones evaporativas.

Posteriormente, durante el plan de la nueva normalidad que, incluía la reapertura parcial o total de algunas actividades, también se observaron cambios en los niveles ambientales de NO_2 , HCHO y CO. Por ejemplo, se observó un aumento del 19 % de NO_2 y un aumento del 20 % de CO en la zona de estudio, sin embargo, el HCHO disminuyó un 27 %, lo anterior, puede atribuirse al incremento de emisiones por el aumento de movilidad del parque vehicular en la zona de estudio.

La elaboración de los diagramas de isopletras indicaron que, la relación COV/ NO_x del 18 al 23 de abril del 2020 fue menor a 8, por lo que, con esta relación se identificó que la zona estuvo dentro del régimen limitado por los COV. Sin embargo, para el día 24 de abril, la

simulación de la relación COV/NO_x fue mayor a 10, por lo que, la relación se identificó en la región limitada por los NO_x . Esto puede explicarse, debido los cambios en los niveles de contaminación en la zona, asimismo, la relación de COV/NO_x no se puede considerar igual para toda la zona urbana, debido a que esta puede variar significativamente, y depende de las fuentes de emisiones más cercanas, por lo que, proponer el uso de diagramas de isopletras para toda una zona metropolitana puede resultar ineficiente.

La disminución de los contaminantes atmosféricos durante el año 2020 fue una situación atípica, pero nos permitió entender mejor el problema del ozono troposférico, y conocer hasta que límite se deben disminuir las emisiones de sus gases precursores para mejorar la calidad del aire.

En conclusión, la presente investigación estuvo enfocada en evaluar las concentraciones de ozono troposférico, y permitió obtener información que contribuye en el estudio de la formación de este gas secundario, y en el diseño de acciones de control para la gestión de la calidad del aire en la ciudad de Cuernavaca, Morelos.

12.- RECOMENDACIONES

Un problema a nivel nacional de las redes de monitoreo atmosférico es que, no miden las especies de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), esto impide entender el proceso fotoquímico del ozono troposférico, es por ello, que se recomienda llevar a cabo el monitoreo de manera continua de las especies de COV.

También, sería importante llevar a cabo una evaluación de la distribución de especies que componen el grupo de COV, y permitirá contar con un inventario en la zona de estudio. Lo anterior, con la finalidad de dar mayor certeza en la identificación del régimen de formación de este contaminante secundario.

De igual manera, es recomendable garantizar la correcta operación del Sistema de Monitoreo Atmosférico del estado de Morelos, para contar con más información sobre el estado actual de la calidad del aire.

Aplicar la percepción remota en estudios de calidad del aire para continuar con las mediciones satelitales e identificar los cambios en la distribución espacial y temporal de los principales contaminantes atmosféricos, principalmente, en aquellas zonas donde las redes de monitoreo no funcionan periódicamente y/o no se cuenta con sistemas de monitoreo.

Por último, es necesario elaborar de manera más periódica el inventario de emisiones a la atmósfera de contaminantes en el estado de Morelos, para actualizar las fuentes de contaminantes atmosféricos, y adicionar nuevas fuentes que contribuyan con el deterioro de la calidad del aire e identificar el comportamiento de estos gases o partículas en la atmósfera.

13.-BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE CONSULTA

1. Barbara J. Finlayson-Pitts, James N. Pitts Jr. (2000). Chemistry of the upper and lower atmosphere: Theory, experiments and applications. Academic press. International standard book number:0-12-257060-x.
2. Colin Baird y Michael Cann (2014). Química ambiental. Segunda edición (Quinta edición original).
3. David Galán Madruga y Rosalía Fernández Patier (2006). Implicaciones de los NO_x en la química atmosférica. Instituto de Salud Carlos III. Centro Nacional de Sanidad Ambiental. Área de Contaminación Atmosférica. Revista electrónica de medioambiente UCM – M+A=IUGA. ISSN 1866-3329.
4. Dick Homero Cuatecontzi, Jorge Gasca (2007). Los gases regulados por la convección marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). Página electrónica: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/437/dick.html> . Fecha de consulta: 01 de septiembre del año 2022.
5. Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica. (2010). Fuentes de emisión de carbón negro en el estado de México. Secretaría del medio ambiente sitio web: www.edomex.gob.mx/portal/page/medioambiente última consulta: 04 de abril del 2016.
6. Dirección de Monitoreo Atmosférico, (2020). Calidad del aire en la ciudad de México. Última consulta 29 de junio del 2020. Sitio web: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php>
7. De La Rosa S., V. Múgica-Álvarez, S. Ramos-Guizar, M. Torres-Rodríguez. (2013). Aerosoles de carbón negro durante la quema de caña de azúcar en Chiapas,

- México. Memorias del primer congreso interamericano de cambio climático, Aidis, Valparaíso, Chile.
8. De La Rosa S., N., Espejo M.F., Millán V.F., Blanco J. S., Múgica A.V. (2014). CA-Análisis de la calidad del aire en Zacatepec, Morelos durante la época de la zafra de la caña de azúcar. *Revista Latinoamericana el ambiente y las Ciencias*, Número especial, (pp.599-603).
 9. Figueras Salvador. (2000). *Introducción al Análisis Multivariante. Estadística*. <http://www.5campus.com/leccion/anamul> . Última consulta: 01 de diciembre del año 2020.
 10. Flores-Ruíz E, Miranda-Navales MG, Villasís-Keever MÁ (2017). El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba estadística adecuada. *Estadística inferencial. Revista Alergia México*; 64(3):364-370.
 11. García, M., Ramírez, H., Ulloa, H., Arias, S., Pérez, A. (2012). Las inversiones térmicas y la contaminación atmosférica en la zona metropolitana de Guadalajara (México). *Investigaciones geográficas (Esp)*, núm. 58, pp. 9-29. Universidad de Alicante. Alicante, España. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=17626807006>
 12. Gilbert M. Masters; Wendell P. Ela (2008). *Introducción a la Ingeniería Medioambiental*. Pearson Educación, S. A., Madrid. Páginas_ 752.
 13. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (INECC). *Gestión de la calidad del aire en México. Logros y retos 1995-2000*, (pp.184).
 14. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). *Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA). Manual 5. Protocolo de Manejo de Datos de la Calidad del Aire*. Página electrónica: <https://sinaica.inec.gob.mx> . Última consulta: 05 de junio del año 2021.

15. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). Informe Nacional de Calidad del Aire 2018. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de la Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos.
16. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Censo Poblacional y Vivienda 2020. Página electrónica: <https://www.inegi.org.mx/> . Última consulta: 17 de mayo del 2021.
17. Jiawei Xu, Xin Huang, Nan Wang, Yuanyuan Li, Aijun Ding (2021). Understanding ozone pollution in the Yangtze River Delta of Eastern China from the perspective of diurnal cycles. Science of the Total Environment. www.elsevier.com/located/scitotenv
18. Jiménez Cisneros, Blanca E. (2001). La contaminación en México: Causas, efectos y tecnología apropiada. México: Limusa, Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A.C., Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISCA. 926 p.
19. José Agustín García Reynoso, Michael Grutter y Daniel Cintora Juárez (2007). Evaluación del Riesgo por Contaminantes Criterio y Formaldehído en la Ciudad de México. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM, Ciudad Universitaria Coyoacán 04510, D.F. México. Rev. Int. Contam. Ambient. 23 (4) 169-175.
20. Kun Zhang, Lili Huang, Yangjun Wang, Juntao Huo, Yusen Duan, Yuhan Wang, Qingyan Fu (2020). The impact of volatile organic compounds on ozone formation in the suburban area of Shanghai. Atmospheric Environment. Journal homepage: <http://www.elsevier.com/locate/atmosenv>
21. Manahan, Stanley E. (2001). Introduction to Chemistry. Fundamentals of Environmental Chemistry. Boca Raton: CRC Press LLC.

22. Maldonado-Pacheco, G., José Agustín García Reynoso, Wolfgang Stremme, Luis Gerardo Ruiz Suárez, José Santos García Yee, Cathy Clerbaux, Pierre Francois Coheur (2021). Carbon dioxide emissions assessment by using satellite and modeling data: Central Mexico case study. *Atmósfera* 34(2), 157-170.
<https://doi.org/10.20937/ATM.52696>
23. María Carmen Gómez, Nieves Durana, José Antonio García, Maite de Blas, Estibaliz Sáez de Gámara, Estibaliz García-Ruiz, Gotzon Gangoiti, Eduardo Torre-Pascual, Jon Iza (2020). Long-term measurement of biogenic volatile organic compounds in a rural background area: contribution to ozone formation. *Atmospheric Environment. Journal Homepage*:
<http://www.elsevier.com/locate/atmosenv>
24. Mengwei Jia, Tianliang Zhao, Xinghong Chen, Sunling Gong, Xiangzhi Zhan, Lili Tang, Duanyang Liu, Xianghua Wu, Liming Wang and Yusheng Chen (2017). Inverse relations of PM_{2.5} and O₃ in air compound pollution between cold and hot seasons over an urban area of east China. *Journal Atmosphere*.
<https://doi.org/10.3390/atmos8030059>
25. Mihelcic, J. – Zimmerman, Julie Beth (2011). *Ingeniería ambiental: Fundamentos – Sustentabilidad – Diseño*. Última consulta: 04 de febrero del año 2021.
26. Mónica del Carmen Jaimes Palomera (2017). Tesis doctoral: Diseño del monitoreo de compuestos precursores de ozono en la atmósfera de la Ciudad de México y su área metropolitana. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México.
27. Múgica V., (2014). Determinación de factores de emisión de carbono negro por la quema de caña de azúcar. 2015, de Universidad Autónoma Metropolitana sitio web:
http://www.inecc.gob.mx/descargas/sqre/2014_accagpp_vmugica.pdf. Última consulta: 04 de abril del 2016.

28. Múgica V., Naxieli Santiago de la Rosa, Figueroa Jesús, Julio Flores-Rodríguez, Miguel Torres-Rodríguez y Miguel Magaña-Reyes, (2015). Emissions of PAHS derived from sugarcane burning and processing in Chiapas and Morelos México. *Science of the total environment* 527-528. (pp. 474-482).
<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.089>
29. Múgica V., Sara Hernández, Miguel Torres & Rocío García (2010). Seasonal Variation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Exposure Levels in Mexico City, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 60:5, (pp. 548-555).,
<https://doi.org/10.3155/1047-3289.60.5.548>
30. Múgica V., Sara Hernández, Miguel Torres & Rocío García (2010). Seasonal Variation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Exposure Levels in Mexico City, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 60:5, (pp.548-555),
<https://doi.org/10.3155/1047-3289.60.5.548>
31. Omid Moeini, David W. Tarasick, C. Thomas McElroy, Jane Liu, Mohammed K. Osman, Anne M. Thompson, Mark Parrington, Paul I. Palmerf, Bryan Johnson, Samuel J. Oltmans, John Merrill (2020). Estimating wildfire-generated ozone over North America using ozone sonde profiles and a differential back trajectory technique. *Journal ELSEVIER: Atmospheric Environment: X*. journal homepage:
<http://www.journals.elsevier.com/atmospheric-environment-x>
32. Organización Mundial de la Salud, (2005). Guías de calidad del aire de la OMS, relativas al material particulado, del ozono, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre. (pp.5).
33. O. Peralta, A. Ortínez-Alvarez, R. Torres-Jardón, et al., Ozone over Mexico City during the COVID-19 pandemic, *Science of the Total Environment*,
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.14318>

34. Pierre Sicard, Alessandra de Marco, et al (2020). Amplified ozone pollution in cities during the COVID-19 lockdown. *Science of the Total Environment*. 735 (2020) 139542. Journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv .
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139542>
35. Retama A., Baumgardner, D., Raga, G. B., McMeeking, G. R., and Walker, J. W. (2015). Seasonal and diurnal trends in black carbon properties and co-pollutants in Mexico City, *Atmospheric Chemistry and Physics*.
36. Richard, Atoro, Camila S. Donoso, Rodrigo A. Seguel, Raul G. E. S. Morales, Manuel A.G. Leiva (2013). Photochemical ozone pollution in the Valparaiso región, Chile. *An International Journal. Air Quality, Atmosphere y Health*. ISSN 1873 - 9818.
37. Ríos B., Raga G. B., (2015). Quemadas Agrícolas en México: Contaminación por Partículas y Producción de Ozono. Última consulta: 15 de noviembre del 2015. Sitio web: <https://prezi.com/czuctibhcrxr/quemas-agricolas-en-mexico-contaminacion-por-particulas-y-p/>
38. Riveros H., (2009). Análisis del programa "hoy no circula". Sitio web: <http://www.fisica.unam.mx/personales/hgriveros/docu/10hoynocircula>. 299122533. PDF. Última consulta: el 29 de junio del año 2020.
39. Rosa Elma Rosendo García (2019). Tesis: Evaluación de los niveles ambientes y fuentes de emisión de partículas respirables (PM_{2.5}), en el Centro de la ciudad de Cautla, Morelos. Universidad Politécnica del Estado de Morelos (UPEMOR).
40. Ruiz-Villavicencio, Ernesto., López-López, Miguel Ángel., Cetina-Alcala, Víctor Manuel., Ramírez-Guzmán, Martha Elva (2019). Modelación y Estimación de NO₂

y O₃ en zonas rurales y suburbanas del Valle de México. Rev. Int. Contam. Ambie. 36 (3) 745-754, 2020. <https://doi.org/10.2937/RICA.53548>

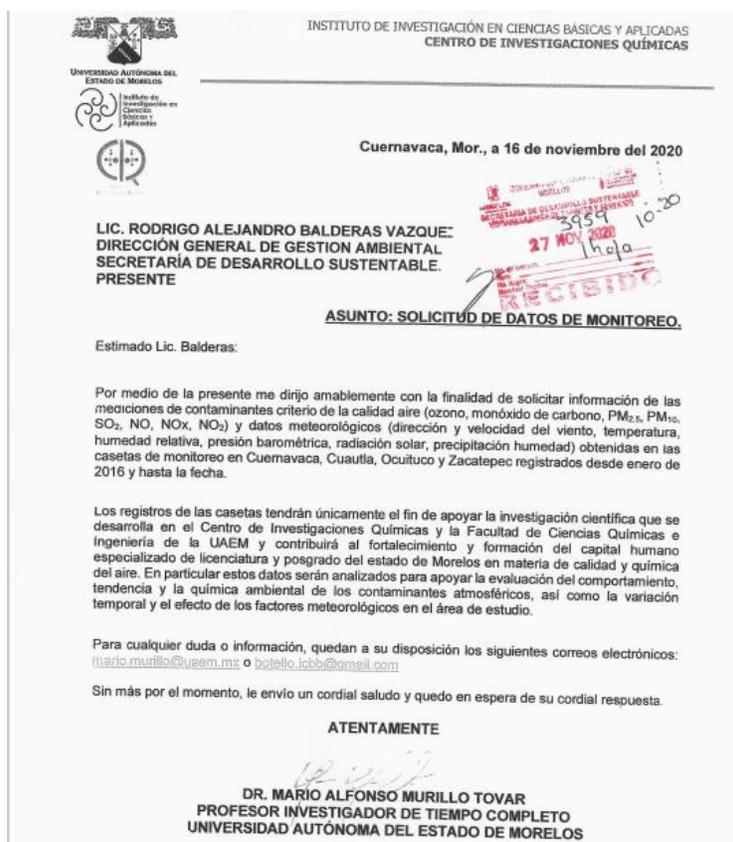
41. Salcedo D., T. Castro, L.G. Ruiz-Suárez, A. García-Reynoso, R. Torres-Jardón, A. Torres-Jaramillo, B.E. Mar-Morales, A. Salcido, A.T. Celada, S. Carreón-Sierra, A.P. Martínez, O.A. Fentanes-Arriaga, E. Deustua, R. Ramos -Villegas, A. Retama-Hernández, M. I. Saavedra, M. Suárez-Lastra. (2012). Study of the regional air quality south of Mexico City (Morelos state). ELSERVIER (Science of the total environment), (pp. 417-432).
42. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2009). Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana de Cuernavaca 2009-2012. Enero, 15 2015. Última consulta el 04 de noviembre del año 2020.
43. Secretaría de Desarrollo Sustentable (2014). Inventario de Emisiones a la Atmósfera de Contaminantes en el Estado de Morelos. <https://sustentable.morelos.gob.mx/ca/inventario-morelos> . Última revisión: 24 de noviembre del año 2020.
44. Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México. Inventario de Emisiones de la Ciudad de México 2016. Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire, Dirección de Programas de Calidad del Aire e Inventario de Emisiones. Ciudad de México. Septiembre, 2018.
45. Secretaría de Desarrollo Sustentable (2019). Programa para el Mejoramiento de la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana de Cuernavaca 2018 – 2027. Última consulta el 24 de noviembre del año 2020.
46. Secretaría de Medio Ambiente del Estado de México (2020). Evaluación de la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de Toluca durante la contingencia por COVID-19.

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/571385/Reporte_Toluca_COVID_Final.pdf . Última revisión: 09 de noviembre del año 2020.

47. Spiro T., Stigliani William. (2004). Química medioambiental. Madrid, España: Pearson educación s.a.
48. Sousa CT, NMP Leme, MPP Martins, FR Silva, TLB Penha, NL Rodrigues, EL Silva, JJ Hoelzemann (2020). Tendencias del ozono en las regiones ecuatoriales y tropicales de América del Sur utilizando el espectrofotómetro Dobson, los instrumentos de satélites TOMS y OMI. Revista de Física Atmosférica y Solar-Terrestre. Revista Elsevier. Julio 2020.
49. Parra, R. (2017). Efecto de fin de semana en la calidad del aire de la ciudad de Cuenca, Ecuador. ACI. Avances en Ciencias e Ingenierías. 9(15),104-111. DOI: <https://doi.org/10.18272/aci.v9i15.291>
50. Pérez, Bruno., Serna, Anita Rita., Delgado, Julián., Caballero, María Elena., Villa, Guillermo (2020). El Programa Copernicus Para la Monitorización del Territorio y los Objetivos del Desarrollo Sostenible. Instituto Geográfico Nacional, Subdirección General de Geodesia y Cartografía. Madrid, España. <https://doi.org/10.7419/162.13.2020>
51. Ricardo Torres-Jardón (2020). Pandemia por COVID-19: ¿Un respiro para el planeta? Instituto de Ciencias Atmosféricas y Cambio Climático (ICAYCC), de la Universidad Nacional Autónoma de México. Página electrónica: <https://www.atmosfera.unam.mx/pandemia-por-covid-19-un-respiro-para-el-planeta/> . Última consulta: 06 de septiembre del año 2022.
52. Zhongchad Tan (2014). Air Pollution and Greenhouse Gases. From Basic Concepts to Engineering Applications for Air Emission Control. Department of Mechanical and Mechatronics Engineering. University of Waterloo. Canada. ISBN 978-981-287-212-8. <https://doi.org/10.1007/978-981-278-212>

ANEXOS:

Se realizó el oficio para la solicitud de datos de monitoreo atmosféricos, y se entregó el pasado 27 de noviembre del año 2020, ante la Secretaría de Desarrollo Sustentable (SDS). Hasta el día de hoy, seguimos en espera de su respuesta.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS
Instituto de Investigación en Ciencias Básicas y Aplicadas

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS BÁSICAS Y APLICADAS
CENTRO DE INVESTIGACIONES QUÍMICAS

Cuernavaca, Mor., a 16 de noviembre del 2020

LIC. RODRIGO ALEJANDRO BALDERAS VAZQUEZ
DIRECCIÓN GENERAL DE GESTIÓN AMBIENTAL
SECRETARÍA DE DESARROLLO SUSTENTABLE.
PRESENTE

ASUNTO: SOLICITUD DE DATOS DE MONITOREO.

Estimado Lic. Balderas:

Por medio de la presente me dirijo amablemente con la finalidad de solicitar información de las mediciones de contaminantes criterio de la calidad aire (ozono, monóxido de carbono, PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, NO, NOx, NO₂) y datos meteorológicos (dirección y velocidad del viento, temperatura, humedad relativa, presión barométrica, radiación solar, precipitación humedad) obtenidas en las casetas de monitoreo en Cuernavaca, Cuautla, Ocutitico y Zacatepec registrados desde enero de 2016 y hasta la fecha.

Los registros de las casetas tendrán únicamente el fin de apoyar la investigación científica que se desarrolla en el Centro de Investigaciones Químicas y la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería de la UAEM y contribuirá al fortalecimiento y formación del capital humano especializado de licenciatura y posgrado del estado de Morelos en materia de calidad y química del aire. En particular estos datos serán analizados para apoyar la evaluación del comportamiento, tendencia y la química ambiental de los contaminantes atmosféricos, así como la variación temporal y el efecto de los factores meteorológicos en el área de estudio.

Para cualquier duda o información, quedan a su disposición los siguientes correos electrónicos:
mario.murillo@uaem.mx; o botello.icbb@uaem.mx

Sin más por el momento, le envío un cordial saludo y quedo en espera de su cordial respuesta.

ATENTAMENTE

[Firma]
DR. MARIO ALFONSO MURILLO TOVAR
PROFESOR INVESTIGADOR DE TIEMPO COMPLETO
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

RECIBIDO
27 NOV 2020
10:20
hoja

ANEXO A. Oficio realizado para solicitar la información ambiental a la Secretaría de Desarrollo Sustentable del estado de Morelos.

ANEXO B. Resumen Estadístico de las concentraciones ambientales de ozono (ppm) 2019.

Pruebas de Normalidad para el 2019.

365 valores con rango desde 0.008 a 0.056

La siguiente tabla (figura #), muestra el resumen estadístico para las concentraciones ambientales de ozono (ppm) 2019. Incluye medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad.

En este caso, el valor de sesgo estandarizado no se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada se encuentra fuera del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

Recuento	365
Promedio	0.029
Desviación Estándar	0.009
Coefficiente de Variación	31.14 %
Mínimo	0.008
Máximo	0.056
Rango	0.048
Sesgo Estandarizado	3.501
Curtosis Estandarizada	-1.01

ANEXO B. Resumen estadístico de las concentraciones ambientales de ozono (ppm) 2019.

ANEXO C. Resumen Estadístico de las concentraciones ambientales de ozono (ppm) 2020.

Datos/Variable: Ozono

366 valores con rango desde 0.0 a 0.077

Por otra parte, el resumen estadístico para la concentración ambiental de ozono (ppm) 2020, presenta las medidas de tendencia central, medidas de variabilidad y medidas de forma. En este caso, el valor del sesgo estandarizado se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes una distribución normal. El valor de curtosis estandarizada no se encuentra dentro del rango esperado para datos provenientes de una distribución normal.

Recuento	366
Promedio	0.032
Desviación Estándar	0.012
Coefficiente de Variación	37.27 %
Mínimo	0.01
Máximo	0.077
Rango	0.076
Sesgo Estandarizado	1.067
Curtosis Estandarizada	2.774

ANEXO C. Resumen de estadísticos para la concentración de ozono en parte por millón 2020.

ANEXO D. Resumen estadístico de las concentraciones ambientales de ozono (ppm) 2021.

Recuento	257
Promedio	0.031
Mediana	0.032
Moda	0.039
Desviación Estándar	0.010
Coefficiente de Variación	33.28 %
Mínimo	0.005
Máximo	0.053
Rango	0.048
Sesgo	-0.280
Sesgo Estandarizado	-1.833
Curtosis Estandarizada	-2.014

ANEXO D. Resumen de estadísticos para la concentración de ozono en parte por millón 2021.

ANEXO E. Comparación de Medianas: 2019 y 2020.

Prueba W de Mann-Whitney (Wilcoxon) para comparar medianas.

Hipótesis Nula: $mediana1 = mediana2$

Hipótesis Alternativa.: $mediana1 <> mediana2$

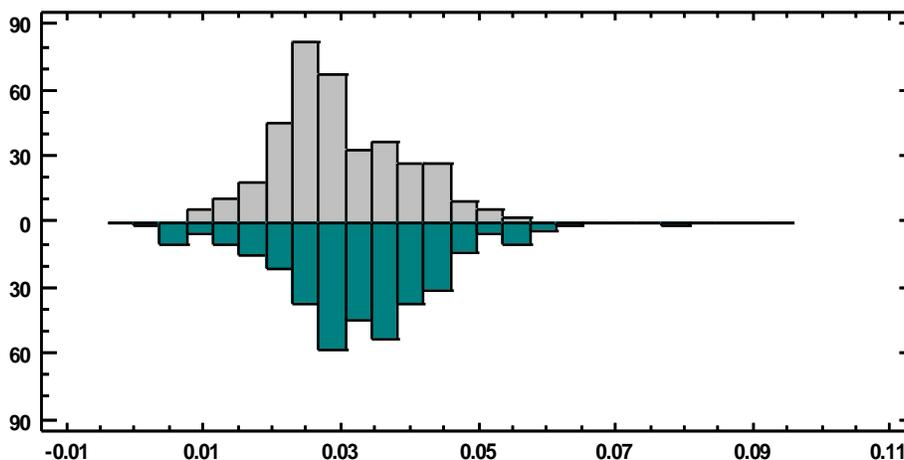
Rango Promedio de muestra 1: 330.959

Rango Promedio de muestra 2: 400.945

$W = 79585.0$ valor-P = 0.00000738274

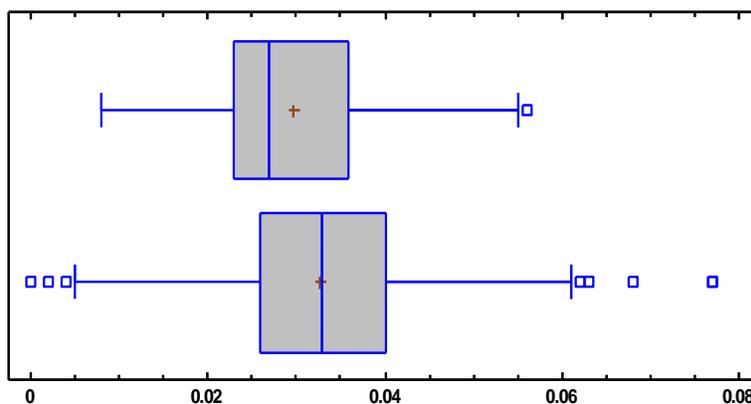
Se rechaza la hipótesis nula para $\alpha = 0.05$.

Debido a que el valor-P es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel de confianza del 95.0%.



ANEXO E. Histograma de frecuencia de los niveles de ozono troposférico (ppm) 2019 (gris) y 2020 (verde).

Asimismo, mediante el diagrama de caja y bigotes, se observa que la mediana de 2019 se ubica 0.029 (ppm), y la mediana de 2020 se encuentra se ubica entre 0.033 (ppm).



ANEXO E. Comparación de las medianas de dos muestras independientes 2019 y 2020.

Por otra parte, se presenta el resumen estadístico por temporadas para las concentraciones de ozono (ppm) 2019.

	Recuento	Promedio	Mediana	Desviación Estándar	Coficiente de Variación	Mínimo	Máximo
Primavera	94	0.038	0.040	0.011	30.80 %	0.008	0.095
Verano	94	0.024	0.024	0.004	17.62 %	0.012	0.034
Otoño	91	0.028	0.026	0.009	33.38 %	0.008	0.053
Invierno	90	0.030	0.029	0.006	21.64 %	0.011	0.046
Total	369	0.029	0.028	0.009	32.90 %	0.008	0.095

ANEXO E. Medidas de tendencia central de los niveles ambientales de ozono (ppm) 2019.

Se presenta el resumen estadístico por temporadas para las concentraciones de ozono (ppm) 2020.

	Recuento	Promedio	Mediana	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo
Primavera	94	0.045	0.045	0.011	25.38 %	0.002	0.080
Verano	94	0.023	0.024	0.009	40.78 %	0.002	0.038
Otoño	91	0.030	0.030	0.006	22.01 %	0.016	0.046
Invierno	90	0.034	0.035	0.009	28.56 %	0.013	0.080
Total	369	0.033	0.033	0.012	37.22 %	0.002	0.08

ANEXO E. Medidas de tendencia central de los niveles ambientales de ozono (ppm) 2020.

Se presenta el resumen estadístico por temporadas para las concentraciones de ozono (ppm) 2021.

	Recuento	Promedio	Mediana	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo
Primavera	94	0.035	0.037	0.009	26.00 %	0.005	0.049
Verano	86	0.022	0.023	0.007	33.33 %	0.007	0.042
Invierno	79	0.036	0.038	0.008	22.79 %	0.019	0.053
Total	259	0.031	0.032	0.010	33.36 %	0.005	0.053

ANEXO E. Medidas de tendencia central de los niveles ambientales de ozono (ppm) 2021.

ANEXO F. Se presenta el análisis de comparación del promedio mensual de las concentraciones de ozono (ppm) 2019 con los LMP de la NOM, EPA US y OMS.

Mes	Promedio mensual Ozono 2019	NOM (ppm)	EPA (ppm)	OMS (ppm)
Enero	0.029	0.070	0.080	0.050
Febrero	0.028	0.070	0.080	0.050
Marzo	0.034	0.070	0.080	0.050
Abril	0.042	0.070	0.080	0.050
Mayo	0.044	0.070	0.080	0.050
Junio	0.023	0.070	0.080	0.050
Julio	0.024	0.070	0.080	0.050
Agosto	0.024	0.070	0.080	0.050
Septiembre	0.023	0.070	0.080	0.050
Octubre	0.021	0.070	0.080	0.050

Noviembre	0.029	0.070	0.080	0.050
Diciembre	0.038	0.070	0.080	0.050

ANEXO F. Comparación mensual de las concentraciones de ozono (ppm) 2019 con los LMP de la NOM, EPA US y OMS.

ANEXO G. Se presenta el análisis de comparación del promedio mensual de las concentraciones de ozono (ppm) 2020 con los LMP de la NOM, EPA US y OMS.

Mes	Promedio mensual Ozono 2020	NOM (ppm)	EPA (ppm)	OMS (ppm)
Enero	0.032	0.070	0.080	0.050
Febrero	0.033	0.070	0.080	0.050
Marzo	0.037	0.070	0.080	0.050
Abril	0.039	0.070	0.080	0.050
Mayo	0.054	0.070	0.080	0.050
Junio	0.039	0.070	0.080	0.050
Julio	0.030	0.070	0.080	0.050
Agosto	0.015	0.070	0.080	0.050
Septiembre	0.021	0.070	0.080	0.050
Octubre	0.032	0.070	0.080	0.050
Noviembre	0.032	0.070	0.080	0.050
Diciembre	0.031	0.070	0.080	0.050

ANEXO G. Comparación del promedio mensual de las concentraciones de ozono (ppm) 2020 con los LMP de la NOM, EPA US y OMS.

ANEXO H. Se presenta el análisis de comparación del promedio mensual de las concentraciones de ozono (ppm) 2021 con los LMP de la NOM, EPA US y OMS.

Mes	Promedio mensual Ozono 2021	NOM (ppm)	EPA (ppm)	OMS (ppm)
Enero	0.032	0.070	0.080	0.050
Febrero	0.038	0.070	0.080	0.050
Marzo	0.040	0.070	0.080	0.050
Abril	0.043	0.070	0.080	0.050
Mayo	0.036	0.070	0.080	0.050
Junio	0.020	0.070	0.080	0.050
Julio	0.026	0.070	0.080	0.050
Agosto	0.023	0.070	0.080	0.050
Septiembre	0.018	0.070	0.080	0.050

ANEXO H. Comparación del promedio mensual de las concentraciones de ozono (ppm) 2021 con los LMP de la NOM, EPA US y OMS.

ANEXO I. Análisis multivariado:

A continuación, se presentan las gráficas de correlación para las concentraciones de ozono (ppm) 2019 versus los contaminantes criterio: El tercer número en cada bloque de la tabla muestra el valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Valores-P abajo de 0.05 indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95.0%. Los siguientes pares de variables tienen valores-P por debajo de 0.05:

Notas:

Correlación:

Tamaño de Muestra():

Valor-P (color rojo):

Correlación Ordinal de Spearman 2019

	Ozono (ppm)	CO (ppm)	NO2 (ppm)	PM10	PM2.5	SO2
Ozono (ppm)		-0.0763 (303)	0.2709 (303)	0.8160 (303)	0.7251 (303)	-0.0573 (303)
		0.1848	0.0000	0.0000	0.0000	0.3196
CO (ppm)	-0.0763 (303)		-0.1647 (303)	-0.0894 (303)	-0.1441 (303)	0.1185 (303)
		0.1848	0.0042	0.1202	0.0123	0.0394
NO2 (ppm)	0.2709 (303)	-0.1647 (303)		0.3281 (303)	0.3292 (303)	-0.0825 (303)
		0.0000	0.0042	0.0000	0.0000	0.1518
PM10	0.8160 (303)	-0.0894 (303)	0.3281 (303)		0.8259 (303)	-0.1906 (303)
		0.0000	0.1202	0.0000	0.0000	0.0009
PM2.5	0.7251 (303)	-0.1441 (303)	0.3292 (303)	0.8259 (303)		-0.1797 (303)
		0.0000	0.0123	0.0000	0.0000	0.0018
SO2	-0.0573 (303)	0.1185 (303)	-0.0825 (303)	-0.1906 (303)	-0.1797 (303)	
		0.3196	0.0394	0.1518	0.0009	0.0018

ANEXO I. Correlación de las concentraciones de ozono 2019.

Asimismo, se presentan las gráficas de correlación para las concentraciones de ozono (ppm) 2019 versus las variables meteorológicas: El tercer número en cada bloque de la tabla muestra el valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Valores-P abajo de 0.05 indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95.0%. Los siguientes pares de variables tienen valores-P por debajo de 0.05:

Notas:
Correlación:
Tamaño de Muestra():
Valor-P (color rojo):

Correlación Ordinal de Spearman 2019

	Ozono (ppm)	HM (%)	Temperatura °C	RS (W/m)	VV (m/s)	DV (Å°A)
Ozono (ppm)		-0.4715	0.2426	0.3585	0.5053	-0.2505
		(364)	(364)	(364)	(364)	(364)
		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
HM (%)	-0.4715		-0.5210	-0.2335	-0.3896	0.2296
	(364)		(364)	(364)	(364)	(364)
	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Temperatura °C	0.2426	-0.5210		0.3535	-0.0222	0.2055
	(364)	(364)		(364)	(364)	(364)
	0.0000	0.0000		0.0000	0.6722	0.0001
RS (W/m)	0.3585	-0.2335	0.3535		0.4008	0.1104
	(364)	(364)	(364)		(364)	(364)
	0.0000	0.0000	0.0000		0.0000	0.0354
VV (m/s)	0.5053	-0.3896	-0.0222	0.4008		-0.5303
	(364)	(364)	(364)	(364)		(364)
	0.0000	0.0000	0.6722	0.0000		0.0000
DV (Å°A)	-0.2505	0.2296	0.2055	0.1104	-0.5303	
	(364)	(364)	(364)	(364)	(364)	
	0.0000	0.0000	0.0001	0.0354	0.0000	

ANEXO I. Correlación de las concentraciones de ozono 2019.

El tercer número en cada bloque de la tabla muestra el valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Valores-P abajo de 0.05 indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95.0%. Los siguientes pares de variables tienen valores-P por debajo de 0.05:

Notas:

Correlación:

Tamaño de Muestra():

Valor-P (color rojo):

Correlación Ordinal de Spearman 2020

	Ozono	PM2.5	PM10	CO (PPM)	NO2 (PPM)	SO2
Ozono		0.5097	0.6738	0.4197	-0.0578	0.2073
		(328)	(328)	(328)	(328)	(328)
		0.0000	0.0000	0.0000	0.2956	0.0002
PM2.5	0.5097		0.6966	0.0162	0.0507	0.2196
	(328)		(328)	(328)	(328)	(328)
	0.0000		0.0000	0.7699	0.3592	0.0001
PM10	0.6738	0.6966		0.3191	0.2550	0.3753
	(328)	(328)		(328)	(328)	(328)
	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000
CO (PPM)	0.4197	0.0162	0.3191		-0.0312	-0.0659
	(328)	(328)	(328)		(328)	(328)
	0.0000	0.7699	0.0000		0.5721	0.2332
NO2 (PPM)	-0.0578	0.0507	0.2550	-0.0312		0.5079
	(328)	(328)	(328)	(328)		(328)
	0.2956	0.3592	0.0000	0.5721		0.0000
SO2	0.2073	0.2196	0.3753	-0.0659	0.5079	
	(328)	(328)	(328)	(328)	(328)	
	0.0002	0.0001	0.0000	0.2332	0.0000	

ANEXO I. Correlación de las concentraciones de ozono 2020.

El tercer número en cada bloque de la tabla muestra el valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Valores-P abajo de 0.05 indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95.0%. Los siguientes pares de variables tienen valores-P por debajo de 0.05:

Notas:

Correlación:

Tamaño de Muestra ():

Valor-P (color rojo):

Correlación Ordinal de Spearman 2020

	Ozono	RS (W/m)	Húmedad relativa (%)	Temp (°C)	VV (m/s)	DV
Ozono		0.5387	-0.3412	0.3481	0.5531	-0.3543
		(365)	(365)	(365)	(365)	(365)
		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
RS (W/m)	0.5387		-0.6871	0.5320	0.8300	-0.8094
	(365)		(365)	(365)	(365)	(365)
	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
Húmedad relativa (%)	-0.3412	-0.6871		-0.4897	-0.6334	0.5676
	(365)	(365)		(365)	(365)	(365)

	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000	0.0000
Temp (°C)	0.3481	0.5320	-0.4897		0.2671	-0.3903
	(365)	(365)	(365)		(365)	(365)
	0.0000	0.0000	0.0000		0.0000	0.0000
VV (m/s)	0.5531	0.8300	-0.6334	0.2671		-0.7131
	(365)	(365)	(365)	(365)		(365)
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000		0.0000
DV	-0.3543	-0.8094	0.5676	-0.3903	-0.7131	
	(365)	(365)	(365)	(365)	(365)	
	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	

ANEXO I. Correlación de las concentraciones de ozono 2020.

El tercer número en cada bloque de la tabla muestra el valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Valores-P abajo de 0.05 indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95.0%. Los siguientes pares de variables tienen valores-P por debajo de 0.05:

Notas:

Correlación:

Tamaño de Muestra():

Valor-P (color rojo):

Correlación Ordinal de Spearman 2021

	O3	PM2.5	PM10	CO	NO2
O3		0.5655	0.7917	0.2198	0.1979
		(248)	(248)	(248)	(248)
		0.0000	0.0000	0.0006	0.0019
PM2.5	0.5655		0.6653	0.1956	0.1745
	(248)		(248)	(248)	(248)
	0.0000		0.0000	0.0021	0.0061
PM10	0.7917	0.6653		0.2993	0.2369
	(248)	(248)		(248)	(248)
	0.0000	0.0000		0.0000	0.0002
CO	0.2198	0.1956	0.2993		0.6501
	(248)	(248)	(248)		(248)
	0.0006	0.0021	0.0000		0.0000
NO2	0.1979	0.1745	0.2369	0.6501	
	(248)	(248)	(248)	(248)	
	0.0019	0.0061	0.0002	0.0000	

ANEXO I. Correlación de las concentraciones de ozono 2021.

El tercer número en cada bloque de la tabla muestra el valor-P que prueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Valores-P abajo de 0.05 indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95.0%. Los siguientes pares de variables tienen valores-P por debajo de 0.05:

Correlación Ordinal de Spearman 2021

	O3	Temperatura	HR (%)	VV (m/s)
O3		0.6528 (257)	-0.7619 (257)	0.2834 (257)
		0.0000	0.0000	0.0000
Temperatura	0.6528 (257)		-0.5324 (257)	-0.0212 (257)
	0.0000		0.0000	0.7343
HR (%)	-0.7619 (257)	-0.5324 (257)		-0.4396 (257)
	0.0000	0.0000		0.0000
VV (m/s)	0.2834 (257)	-0.0212 (257)	-0.4396 (257)	
	0.0000	0.7343	0.0000	

ANEXO I. Correlación de las concentraciones de ozono 2021.

ANEXO J. Análisis de Componentes Principales (PCA):

Este procedimiento ejecuta un análisis de componentes principales. El propósito del análisis es obtener un número reducido de combinaciones lineales de las 6 variables que expliquen la mayor variabilidad en los datos. En este caso, 2 componentes se han extraído puesto que 2 componentes tuvieron eigenvalores mayores o iguales que 1.0. En conjunto ellos explican 64.15 % de la variabilidad en los datos originales:

<i>Componente</i>		<i>Porcentaje de</i>	<i>Porcentaje</i>
<i>Número</i>	<i>Eigenvalor</i>	<i>Varianza</i>	<i>Acumulado</i>
1	2.70221	45.037	45.037
2	1.14703	19.117	64.154
3	0.863613	14.394	78.548
4	0.806412	13.440	91.988
5	0.361446	6.024	98.012
6	0.119291	1.988	100.000

ANEXO J. Porcentaje de los componentes principales para ozono 2019.

Tabla de Pesos de los Componentes

	<i>Componente</i>	<i>Componente</i>
	1	2
Ozono (ppm)	0.53026	0.176107
CO (ppm)	-0.150892	0.626472
NO2 (ppm)	0.302152	-0.239586
PM10	0.57307	0.0921902
PM2.5	0.51968	0.146529
SO2	-0.0792709	0.699391

ANEXO J. Porcentaje de los componentes principales para las concentraciones de ozono 2019.

Este procedimiento ejecuta un análisis de componentes principales. El propósito del análisis es obtener un número reducido de combinaciones lineales de las 6 variables que expliquen la mayor variabilidad en los datos. En este caso, 2 componentes se han extraído puesto que 2 componentes tuvieron eigenvalores mayores o iguales que 1.0. En conjunto ellos explican 66.15 % de la variabilidad en los datos originales.

Análisis de Componentes Principales

<i>Componente</i>		<i>Porcentaje de</i>	<i>Porcentaje</i>
<i>Número</i>	<i>Eigenvalor</i>	<i>Varianza</i>	<i>Acumulado</i>
1	2.55675	42.612	42.612
2	1.41258	23.543	66.155
3	0.928428	15.474	81.629
4	0.524835	8.747	90.377
5	0.418816	6.980	97.357
6	0.158592	2.643	100.000

ANEXO J. Porcentaje de los componentes principales para ozono 2020.

Tabla de Pesos de los Componentes

	<i>Componente</i>	<i>Componente</i>
	1	2
Ozono	0.481593	-0.26063
PM2.5	0.500967	-0.136795
PM10	0.577556	0.00827707
CO (PPM)	0.291707	-0.291266
NO2 (PPM)	0.161464	0.667539
SO2	0.269008	0.618746

ANEXO J. Porcentaje de los componentes principales para las concentraciones de ozono 2020.

Este procedimiento ejecuta un análisis de componentes principales. El propósito del análisis es obtener un número reducido de combinaciones lineales de las 6 variables que expliquen la mayor variabilidad en los datos. En este caso, 2 componentes se han extraído puesto que 2 componentes tuvieron eigenvalores mayores o iguales que 1.0. En conjunto ellos explican 78.01 % de la variabilidad en los datos originales.

<i>Componente</i>		<i>Porcentaje de</i>	<i>Porcentaje</i>
<i>Número</i>	<i>Eigenvalor</i>	<i>Varianza</i>	<i>Acumulado</i>
1	2.59005	51.801	51.801
2	1.31066	26.213	78.014
3	0.459693	9.194	87.208
4	0.430876	8.618	95.825
5	0.208725	4.175	100.000

ANEXO J. Porcentaje de los componentes principales para ozono 2021.

Tabla de Pesos de los Componentes

	<i>Componente</i>	<i>Componente</i>
	1	2
O3	0.492934	-0.300167
PM2.5	0.5125	-0.226697
PM10	0.555412	-0.22258
CO	0.304203	0.637787
NO2	0.305511	0.634188

ANEXO J. Porcentaje de los componentes principales para las concentraciones de ozono 2021.



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA

Programas educativos de calidad reconocidos por CIEES, CACEI y CONACYT
SGC Certificada en la norma ISO 9001:2015



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

FORMATO T-2
NOMBRAMIENTO DE COMISIÓN REVISORA
Y DICTAMEN DE REVISIÓN

Cuernavaca, Mor., a 16 de noviembre de 2022.



DR. HUGO ALBEIRO SALDARRIAGA NOREÑA
DRA. MARIANA ROMERO AGUILAR
DR. MARIO ALFONSO MURILLO TOVAR
DR. JOSÉ ABRAHAM ORTÍNEZ ALVAREZ
M. EN C. JOSÉ DE JESÚS DÍAZ TORRES
P R E S E N T E

Por este conducto, me permito informarle que ha sido asignado como integrante de la Comisión Revisora de la tesis que presenta JULIO CESAR BOTELLO BOTELLO, titulada: “EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN AMBIENTAL DE OZONO TROPOSFÉRICO, DURANTE LA CONTINGENCIA SANITARIA DEL COVID-19, EN EL MUNICIPIO DE CUERNAVACA, MORELOS”, realizada bajo la dirección del DR. MARIO ALFONSO MURILLO TOVAR del Programa Educativo de Maestría en Ingeniería Ambiental y Tecnologías Sustentables. Agradezco su valiosa participación en esta Comisión y quedo a sus órdenes para cualquier aclaración o duda al respecto.

A T E N T A M E N T E
Por una humanidad culta

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA DE LA FCQEI

D I C T A M E N

DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ
DIRECTORA DE LA FCQEI
P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para formar parte de la Comisión Revisora de la tesis mencionada y una vez realizada la revisión correspondiente, me permito informarle que mi VOTO es:.

D I C T A M E N

NOMBRE	VOTO	FIRMA
Dr. Hugo Albeiro Saldarriaga Noreña	APROBADO	
Dra. Mariana Romero Aguilar	APROBADO	
Dr. Mario Alfonso Murillo Tovar	APROBADO	
Dr. José Abraham Ortínez Álvarez	APROBADO	
M. en C. José de Jesús Díaz Torres	APROBADO	

Se anexan firmas electrónicas

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ | Fecha:2022-11-16 14:31:15 | Firmante

oK6O34E77EPsNI2ifl+kiCTjgcol62O3l+XLvE5pga4NGxw6jKXg6QrXU16Sp1vfiLintOUEOwvd3pmbItvC1H++vrPpB3VhgWFj6k3GD1Eiu6shW3u+V+2poY3aoeTN0dNZ33ME8s8TF2wzBbYPUKr04ty+tfmVYfhY2ScYye8TdlSszEljkCh09YdXmAtBV2H+jcFDvr30Ew1Iqleo55szhm+ujoRS/DNDp9pIDF9IkHDGqAik1cmvqecdSsrcAR5maJlqSJhyhk05KYBg9t8+pVfgdGyg3G+S2lQw+WWo5UcVU340bqrkhZ7ooO0uK+WkmOfpjtN5Z7A8VncJKw==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[xH5odOev3](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/caynNDRDkhmt8rptP827qkcwUaLE3YU8>



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

Sello electrónico

HUGO ALBEIRO SALDARRIAGA NOREÑA | Fecha:2022-11-17 10:40:31 | Firmante

YKtCXwOYnS/Ht5RDAH4bRBCzr0tSkbjQkTgxNMc2tDIgM8+vVvPUuN92Gi6i6L4OBAa3E5/Sw8i8j1tSiCwBQe6izwIDoMY9E3DCH3DHU5t1sKErzhKe1I1MolfnNob4CHP5z08Si68+720N8yVz4E8LWfNvqqj8nyiC2dAc2uZDfBf9vU7OZANLnyJBYzIFwwaYUnMiHULJPO8T4hret9Gu/NhIGCZr0tAsRNG39IGHYbLAat+YH49qCU8/pqRkiP96YVNYsFkO7Y PDrwClu9UCma1q3NtZu/jr0fDdPHQ802aCz+c2Pyr7jybf6iryY53n4kOaLiobNX+M8A==

MARIO ALFONSO MURILLO TOVAR | Fecha:2022-11-17 16:26:32 | Firmante

R9GkQq6yUHLyqSnLeP4QPe9MfQnALWhzZZIFiYTLFQmdM33p1pmwfOhXBtZb7d2gQV8l+7RfM3EFJ1+ViVa+rJO8V7GvTElaeK/lasR17rTjydXE3JQrUHxQhWiiXaulXr5DM7R07V7vf3Sjcre/nDKC2PcfPe1JkKthUQGq14S6FXOB7owJ57hlcZPNrO90RO18bpw0G+S8CD/xfXdSqC+2FgSkrd1leq4ChwQgdj4/kQoS0uJMg0nYmVy3YVnPCWPITBLh67nn//0SvP6yIz/zf2QLJWs1uGgvpv7Ar81o9YVUH1rIv+0QZnLR+WNg4GUVyH9tFI26Uuyi6IA==

MARIANA ROMERO AGUILAR | Fecha:2022-11-17 21:53:50 | Firmante

F3AQmmZo8fqVJUT1kCq4KRij2KCJ4l+I3oSy8zN58IAWVHi+cB4fQ5278tlluCEhV6dbZkXFdw4LACOEDV3qVWevZziY11gTAwTaiSeu/ruDiLGHSVekMe4dgCsoov6dnBCP4XHwTah0jCqDxsXOXVHrV/zXEIWhTQwm3yl/cw7yjc4JhZVSYTDjshRhK5M90iQemlyCHt3F8OuhOx4zBESIOAA8SmJqlWLM4aihCEBlaw3+Pmb3hqiX1xGWjdvBzies8dyXqQEZhhRvoeZ2pWadnHoMddh3in772DHbxzgLbdqrPGeA3VwXB4c9UCB77wkhtCvKUp2qzibS1A==

JOSÉ DE JESÚS DÍAZ TORRES | Fecha:2022-11-17 21:59:41 | Firmante

VxuUyL9pgFrBaV4onBOPdZxB6GjpKq9JEw3Qqq+/JluwhPtPB31pta+hkkyIrl/JuUVfdgxuNVQMkeSI0eqD4X40kjliFtz85K1aebjwHJrrBmofCDxDRC6otjDBS9+0SZW0Q6sCIUnsPO/aQTwsC25aWQdwyfNg4jh6qoVRCf7/jue+KvsX3/s04C5RoiNadQQR2Uen/43pcZz081e+W3SnkiAKC//36ZrJ/L1P9PJHtgOlacu+wxL1pXQ668xUAYnMC5imabpM5pkdWBi+ENnPPsM8kwSYQL6d20FOqjhSHMkkmn0H4loJrAT5UmalOfloKJKciHBEOj2cDcOw==

JOSE ABRAHAM ORTINEZ ALVAREZ | Fecha:2022-11-21 16:53:10 | Firmante

VpnA0r9xNBSgrPjZ18XSm1CvWVg2uOMVjrMMBsoC8amQhSDuiYKgtPjQTF/6fC9L6tZjgK0yelsmOYGtxgFmbcfxc/qHz7zbAeEneJrKEWUvslj++8goqXIYD10Fr4eq6May8xyZZnN1dJAlcnjdZE7DFWfJ/5wla+ofWiiNOeDkWomA3BHd9h2Oo/3O9hQ/cAUTD0whnuN81Tuh8zyGveU/KZN6QagjPaN7fN/YM8gkjouUv5KESzJo4VdRRdNivWrmXbTj8IHb49gtB8aRd7tG66dKs25ZjX7sMIE2q2B0wXq8gBzIsOgoi3R9VEA/88nHC0hwiN7831CmpQ==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



8FTEcu5Cv

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/w4WBMJf6sHtAiuJhBXwaQYY6MKTxwuOm>

