



**Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“COMPORTAMIENTO DE LOS CONTAMINANTES
CRITERIO Y SU RELACIÓN CON LA
METEOROLOGÍA DURANTE EL PERIODO 2012-
2017: MUNICIPIO DE PUEBLA”**

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el Título de:

Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Presenta:

VANESSA GUADALUPE CERCAS GUTIERREZ

Director de Tesis:

Dra. María de los Ángeles Velasco Hernández

Co-Director de Tesis:

M.C Lluvia Sofía Gómez Texon

Puebla, Pue. 2020



BUAP.

Oficio No. FIQ/AC/288/2019
Asunto: Registro de Tema de Tesis

**C. VANESSA GUADALUPE CERCAS GUTIERREZ
PASANTE DE LA LICENCIATURA
EN INGENIERÍA AMBIENTAL
PRESENTE:**

Por medio del presente me permito informarle, de la aprobación del Registro de Tema de Tesis de la Licenciatura en Ingeniería Ambiental cuyo título es el siguiente:

**"COMPORTAMIENTO DE LOS CONTAMINANTES CRITERIO Y SU RELACIÓN CON LA
METEOROLOGÍA DURANTE EL PERIODO 2012-2017: MUNICIPIO DE PUEBLA"**

Con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN

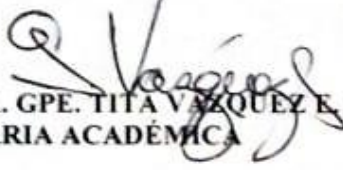
CAPÍTULO 1	ANTECEDENTES
CAPÍTULO 2	METODOLOGÍA
CAPÍTULO 3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN

**CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA**

Directora de Tesis: Dra. María de los Ángeles Velasco Hernández
Co-Directora de Tesis: M.C Lluvia Sofía Gómez Texon

Lo cual me permito comunicarle para su conocimiento y fines consiguientes aclarando que la vigencia de este tema será **ÚNICAMENTE POR UN AÑO.**

ATENTAMENTE
"Pensar Bien, Para Vivir Mejor"
H. Puebla de Z., a 26 de Abril de 2019


M.I.C. MA. GPE. TITA VAZQUEZ E. DE LOS MONTEROS
SECRETARIA ACADÉMICA



C.c.p. Directora de Tesis: Dra. María de los Angeles Velasco Hernández
C.c.p. Co-Directora de Tesis: M.C Lluvia Sofía Gómez Texon
C.c.p. Minutario Facultad de Ingeniería Química

Facultad
de Ingeniería
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San
Manuel, Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72590
01 (222) 229 55 00
Exts. 7250 y 7251

CTAI01



**Benemérita Universidad
Autónoma de Puebla
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**



CIUDAD UNIVERSITARIA

**M.I.C María Guadalupe Tita
Vázquez Espinoza de los Monteros
Secretaria Académica de la
Facultad de Ing. Química BUAP
Presente**

**ASUNTO:
AUTORIZACIÓN
IMPRESIÓN DE TESIS**

Por este conducto me permito presentar a Ud. al C. pasante de la carrera de Ingeniería Ambiental

Vanessa Guadalupe Cercas Gutierrez

Quién presenta como tema de tesis:

Comportamiento de los contaminantes criterio y su relación con la meteorología durante el periodo 2012-2017: Municipio de Puebla.

La cual ha sido debidamente revisada y se autoriza para su impresión correspondiente.

Sin otro particular y para los fines que se estimen conducentes reitero mi distinción.

ATENTAMENTE

“Pensar Bien, para Vivir Mejor”

H. Puebla de Z., a 12 de Agosto de 2020

Director de Tesis
Dra. María de los Ángeles Velasco Hernández

Dedicado
A mis padres
Por su apoyo incondicional

Agradezco principalmente a la SDRSOT, la CONAGUA, la DIAU quienes me brindaron los datos necesarios para la realización de esta investigación, así como a CUPREDER por el apoyo para la elaboración de mapas en Sistemas de Información Geográfica, a mis asesoras, la Mtra. Lluvia Sofía Gómez Texon y la Dra. María de los Ángeles Velasco Hernández, por guiarme en esta investigación, por su tiempo, experiencia, dedicación y conocimiento dedicado a este proyecto y a mi Familia que siempre estuvo a mi lado.

Contenido

Introducción	8
Planteamiento de problema	8
Justificación	9
Objetivos	11
Objetivo general	11
Objetivos específicos	11
Hipótesis	11
Capítulo I. Antecedentes	12
Contaminante criterio	12
Calidad del aire y normatividad	12
Efectos en la salud.....	18
Monóxido de carbono (CO).....	18
Ozono (O ₃).....	19
Dióxido de Azufre (SO ₂).....	20
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	20
Material Particulado (PM)	21
Efecto en plantas y materiales	22
Monóxido de Carbono (CO).....	23
Ozono (O ₃).....	23
Dióxido de azufre (SO ₂)	23
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	24
Material Particulado (PM)	24
Contaminación atmosférica	25
Atmósfera.....	25
Estructura vertical de la atmósfera.....	26
Capa límite planetaria.....	28

Escala de la atmósfera	30
Dispersión de contaminantes	31
Factores de dispersión de los contaminantes	32
Deposición de contaminantes	35
Química de los contaminantes	36
Química del Ozono	36
Química de las Partículas	37
Química de Monóxido de Carbono.....	38
Química del Dióxido de Azufre.....	39
Química de Dióxido de Nitrógeno	40
Modelos de Dispersión	42
Monitoreo Atmosférico	42
Estaciones de monitoreo atmosférico	43
Descripción del área de estudio	44
Localización.....	44
Aspectos demográficos y económicos	45
Aspectos ambientales.....	47
Situación Ambiental	49
Red de Estatal de Monitoreo Atmosférico	51
Capítulo II. Metodología	52
Climatología	52
Clasificación de datos de contaminantes.....	54
Clasificación de datos meteorológicos.....	55
Gráficas de comparación de datos meteorológicos y contaminantes	60
Clasificación de datos para comparación con la norma.....	61
Descripción de ubicación de estaciones de monitoreo atmosférico	67
Estación Agua Santa	67

Estación Ninfas.....	67
Estación BINE	68
Estación UTP.....	68
Estación Velódromo.....	68
Capítulo III. Resultados y Discusión	70
Comportamiento de contaminantes criterio frente a variables meteorológicas	70
Comportamiento de CO frente a variables meteorológicas.....	71
Comportamiento estacional del CO	72
Comportamiento de NO ₂ frente a variables meteorológicas	73
Comportamiento estacional de NO ₂	74
Comportamiento de SO ₂ frente a variables meteorológicas.....	75
Comportamiento estacional de SO ₂	77
Comportamiento de O ₃ frente a variables meteorológicas.....	78
Comportamiento estacional de O ₃	79
Comportamiento de PM _{2.5} y PM ₁₀ frente a variables meteorológicas	80
Comportamiento estacional de Material Particulado	82
Dirección del viento.....	83
Estación DIAU	84
Estación UPN	84
Estación Observatorio.....	86
Estación Echeverría.....	87
Tendencia anual de la concentración de los contaminantes criterio	88
Comportamiento del O ₃ en el Municipio de Puebla	88
Comportamiento de PM _{2.5} en el Municipio de Puebla.....	91
Comportamiento de PM ₁₀ en el Municipio de Puebla	93
Comportamiento del CO en el Municipio de Puebla.....	96
Comportamiento del SO ₂ en el Municipio de Puebla	100

Comportamiento del NO ₂ en el Municipio de Puebla.....	103
Cumplimiento de la normatividad de la Secretaría de Salud.....	106
Cumplimiento de la NOM-020-SSA1-2014.....	107
Cumplimiento de la NOM-021-SSA1-1993.....	109
Cumplimiento de la NOM-022-SSA1-2010.....	110
Cumplimiento de la NOM-023-SSA1-1993.....	115
Cumplimiento de la NOM-025-SSA1-2014.....	117
Por otro lado, la NOM-025-SSA1-2014, también establece límites anuales para las PM ₁₀ y PM _{2.5}	118
Conclusiones	121
Recomendaciones	123
Aportaciones.....	124
Bibliografía.....	125
Anexo 1 Comparaciones	130
Monóxido de Carbono (CO)	130
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	141
Dióxido de Azufre (SO ₂).....	150
Ozono (O ₃).....	160
Material Particulado (PM)	173

Índice de Figuras

Figura 1 Capas de la atmósfera.....	28
Figura 2 Esquema de la capa límite planetaria.....	30
Figura 3 Diagrama de estación de monitoreo atmosférico.....	44
Figura 4 Mapa del Municipio de Puebla.	45
Figura 5 Mapa de la población del Municipio de Puebla por manzana.	46
Figura 6 Dinámica Poblacional del Municipio de Puebla 2005-2030	47
Figura 7 Mapa de climas presentes en el Municipio de Puebla.	48
Figura 8 Mapa de los rangos de temperatura presentes en el Municipio de Puebla.....	49
Figura 9 Mapa de precipitación del Municipio de Puebla.....	49
Figura 10 Mapa de la ubicación de estaciones meteorológicas y estaciones de monitoreo atmosférico pertenecientes a la REMA.	51
Figura 11 Elaboración de tabla y gráfica del comportamiento anual de los contaminantes criterio.....	55
Figura 12 Datos de variables meteorológicas provenientes de estaciones de CONAGUA	57
Figura 13 Datos de variables meteorológicas provenientes de estaciones de DIAU	57
Figura 14 Tabla para la elaboración de la Rosa de los Vientos.....	58
Figura 15 Exportación de tabla de elaboración de rosa de vientos al programa WRPLOT View.....	58
Figura 16 Rosa de los vientos elaborada en el programa WRPLOT View.....	59
Figura 17 Rosa de los vientos exportada en Google Earth	59
Figura 18 Tabla y gráfica del comportamiento estacional de los contaminantes	61
Figura 19 Determinación del promedio móvil de ocho horas y el máximo anual.....	174
Figura 20 Tabla y gráfica de comparación con los límites de la norma	63
Figura 21 Determinación de la segunda mayor concentración del SO ₂	64
Figura 22 Obtención de celdas vacías	174
Figura 23 Fórmula para la obtención de datos validos	65
Figura 24 Obtención de porcentajes de datos validos trimestralmente para partículas ...	65
Figura 25 Elaboración de promedios horarios de la concentración de partículas	66
Figura 26 Estaciones de monitoreo atmosférico pertenecientes a la REMA.....	69
Figura 27 Comportamiento Estacional del Monóxido de Carbono.....	73
Figura 28 Comportamiento Estacional del Dióxido de Nitrógeno.....	75
Figura 29 Comportamiento Estacional del Dióxido de Azufre.....	77

Figura 30 Comportamiento Estacional del Ozono	80
Figura 31 Comportamiento Estacional PM ₁₀	83
Figura 32 Comportamiento Estacional PM _{2.5}	83
Figura 33 Rosa de vientos de estación DIAU 2012-2017	84
Figura 34 Dirección del viento en comparaciones A y B.....	84
Figura 35 Rosa de vientos de estación UPN 2012-2017	85
Figura 36 Dirección del viento en la comparación C.....	85
Figura 37 Rosa de vientos de estación Observatorio 2012-2017	86
Figura 38 Dirección del viento en la comparación D.....	86
Figura 39 Rosa de vientos de estación Echeverría 2012-2017.....	87
Figura 40 Dirección del viento en la comparación D.....	87

Índice de Tablas

Tabla 1 Normatividad Mexicana de contaminantes criterio para la salud pública.....	13
Tabla 2 Estándares de la calidad del aire en Estados Unidos	14
Tabla 3 Estándares de calidad del aire establecidos por la OMS.	15
Tabla 4 Criterio de suficiencia anual en cada estación de monitoreo atmosférico periodo 2012-2017	106

Abreviaturas

SO₂ Dióxido de azufre

CO Monóxido de carbono

NO₂ Dióxido de nitrógeno

NO Óxido de nitrógeno

O₃ Ozono

Pb Plomo

PM₁₀ Partículas menores a 10 micrómetros de diámetro

PM_{2.5} Partículas menores a 2.5 micrómetros de diámetro

PST Partículas suspendidas totales

ppb partes por billón

ppm partes por millón

CUPREDER Centro Universitario Para la Prevención de Desastres Regionales

SINAICA Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire

UTP Universidad Tecnológica de Puebla

BINE Benemérito Instituto Normal del Estado

DIAU Departamento de Investigaciones Arquitectónicas y Urbanísticas.

EPA United State Environmental Protection Agency

OMS Organización Mundial de la Salud

SEMARNAT Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales

IMECA Índice Metropolitano de Calidad de Aire

COV Compuestos Orgánicos Volátiles

INEGI Instituto Nacional de Estadística y Geografía

CONAPO Consejo Nacional de Población

SDRSOT Secretaría de Desarrollo Rural, Sustentabilidad y Ordenamiento Territorial

ERIC Extractor Rápido de Información Climatológica

SSA Secretaría de Salud

CONAGUA Comisión Nacional del Agua

BUAP Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

REMA Red Estatal de Monitoreo Atmosférico

PACMUN Programa de Acción Climática Municipal

Introducción

Esta investigación tiene como objetivo analizar desde un enfoque cualitativo el comportamiento de los contaminantes criterio y su relación con las variables meteorológicas en el municipio de Puebla para el periodo 2012-2017, y a su vez conocer la calidad de aire que se tiene en el área de estudio.

Se comenzó por desarrollar los conceptos principales en el Capítulo I, los cuales son contaminante criterio, calidad del aire y la normatividad que la rige, los principales daños a la salud, a las plantas y a los materiales que pueden causar la excesiva concentración en la atmósfera de CO, O₃, SO₂, NO₂, partículas, además, de una breve explicación acerca de la contaminación atmosférica, de la estructura general de la atmósfera, cómo se dispersan los contaminantes en esta y el monitoreo atmosférico que se tiene en el Municipio de Puebla así como una descripción general del área de estudio. Con la finalidad de que estos conceptos sean conocidos, comprendidos de una manera clara y concisa para abordar con mayor facilidad los resultados obtenidos de la investigación.

Por otro lado, en el Capítulo II se desarrolló la metodología empleada en este trabajo la cual consiste en determinar la climatología del Municipio de Puebla, la realización de promedios de las concentraciones de los contaminantes, la clasificación de datos meteorológicos, la comparación de concentración de contaminantes con los límites de la normatividad mexicana y finalmente la descripción de las estaciones de monitoreo atmosférico.

Finalmente, en el Capítulo III se desarrollaron los resultados de la investigación, los cuales se dividen en tres secciones, la primera son las comparaciones entre el comportamiento de los contaminantes criterio frente a las variables meteorológicas precipitación, temperatura, velocidad y dirección de viento. La segunda sección aborda la tendencia anual de los contaminantes criterio en el periodo de evaluación 2012-2017 y finalmente la comparación con la normatividad por parte de la Secretaría de Salud.

Planteamiento de problema

La calidad del aire es un problema global que se ha presentado desde muchos años atrás aproximadamente desde XIV (E. Roberts Alley & Associates, Inc., 2001), sin embargo, en los últimos 200 años ha sido un grave problema debido al crecimiento de la población y la industrialización que produjo grandes cantidades de contaminantes. Cabe mencionar que la contaminación del aire no solo es un problema de emisiones, también es una condición

relacionada con el clima y como tal, debe considerarse como un riesgo (Arya, 1999). Sin embargo, a pesar de los diferentes daños que puede causar una mala calidad del aire en la salud de las personas que están expuestas y el medio ambiente, es hasta años recientes que se han puesto en marcha medidas administrativas y operativas para monitorear y controlar la calidad del aire. Es por esto que en la Ciudad de México se creó la Red de Monitoreo Atmosférico (RAMA) en el año 1986, y fue hasta el año 2000 donde se establecieron para el Municipio de Puebla estaciones de monitoreo atmosférico. Sin embargo, no tienen actualizadas sus bases de datos, causando que la comunidad no sea consciente de la calidad del aire que se tiene día con día, ni de los efectos negativos que puede causar una mala calidad del aire, como son el retraso en el crecimiento de las plantas, deterioro de estas, daños a los materiales, reducción de la visibilidad y daños a salud (Arya, 1999). Algunas dependencias gubernamentales han realizado en años anteriores evaluaciones de la calidad del aire en la zona metropolitana de Puebla, sin embargo, nunca se ha analizado directamente el comportamiento de los contaminantes criterio en relación con las diferentes variables meteorológicas que se pueden presentar en el municipio y esto es de gran importancia ya que los patrones meteorológicos pueden o no favorecer la mejora de la calidad del aire por la dispersión de contaminantes (López, 2016). Los contaminantes criterio son los más perjudiciales a la salud y por lo que se han determinado límites máximos permisibles para su estadía en la atmósfera; los cuales son el ozono, el material particulado, el monóxido de carbono, el dióxido de azufre, el dióxido de nitrógeno y el plomo.

Por ello, es necesario analizar los contaminantes criterio y su relación con la temperatura, la precipitación, la velocidad y la dirección del viento en el municipio de Puebla de años más recientes.

Justificación

Cada día la población crece más, las ciudades aumentan su tamaño, las industrias realizan mayores producciones, el parque vehicular de las zonas urbanas aumenta. Todo esto afecta principalmente a tres medios naturales susceptibles que son el agua, el suelo y el aire. Es por esto por lo que hoy en día diversos investigadores y gobiernos se enfocan en la regulación de la afectación de estos tres medios.

Sin embargo, el aire específicamente la calidad de este es uno de los temas más relevantes ya que a diario se producen miles de toneladas de contaminantes que son emitidos a la

atmósfera (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2017) lo que causa contaminación del aire, a pesar de esto en México hoy en día este tema no es uno de los más estudiados.

Debido al comportamiento de la atmósfera, las variables meteorológicas no se pueden predecir nunca con exactitud, solo se pueden determinar comportamientos generales de episodios pasados y de ellos obtener los valores más probables de las variables meteorológicas que se puedan presentar en el futuro (Espert & Amparo, 2004), de esta manera al relacionar estas variables meteorológicas predominantes del municipio de Puebla y el comportamiento de los contaminantes frente a estas, se podrá conocer la posible concentración y el comportamiento de los contaminantes criterio en futuras circunstancias meteorológicas, además de inferir una aproximación de la calidad del aire del lugar de estudio.

De igual forma se considera relevante la realización de este análisis ya que a pesar de que los gobiernos locales y la sociedad incrementan sus esfuerzos para obtener información confiable de la concentración de contaminantes, sus fuentes y sus efectos (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2017), no son suficientes debido a los datos faltantes obtenidos de las estaciones de monitoreo atmosférico y a la falta de divulgación acerca de la importancia de la calidad del aire. Aunado a esto un análisis de este tipo ayudaría a la concientización de la falta de una política integrada de desarrollo sustentable, que contribuirá a disminuir los impactos sobre la calidad del aire y el medio ambiente en el Municipio de Puebla (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático , 2017).

Finalmente, un análisis de la calidad del aire en municipio de Puebla no solo ayudará a la divulgación de esta en la zona de estudio, sino a la toma de medidas de protección en la salud y el medio ambiente ya que la Organización Mundial de la Salud publicó en 2004 la vinculación que existe entre el incremento de las concentraciones de ozono, dióxido de nitrógeno y material particulado al incremento del riesgo de mortalidad (Coordinación de contaminación y Salud Ambiental , 2016).

Objetivos

Objetivo general

Analizar el comportamiento de los contaminantes criterio y su relación con las variables meteorológicas principalmente temperatura, precipitación, velocidad y dirección del viento en el municipio de Puebla para el periodo 2012-2017.

Objetivos específicos

- Investigar la importancia de la calidad del aire, así como el comportamiento de los contaminantes durante su estadía en la atmósfera y como son afectados por las variables meteorológicas precipitación, temperatura, velocidad y dirección del viento.
- Verificar los tipos de clima existentes en el área de estudio y sus características a través de la elaboración de la climatología para el municipio de Puebla.
- Clasificar los datos de las diferentes concentraciones de los contaminantes criterio y variables meteorológicas temperatura, velocidad y dirección del viento proporcionados por la REMA, DIAU y CONAGUA respectivamente.
- Elaborar gráficas representativas del comportamiento de los contaminantes relacionándolos con las variables meteorológicas presentes en los diferentes periodos.
- Comparar los promedios de las concentraciones de los contaminantes criterio con las normas vigentes de la Secretaría de Salud para conocer la calidad del aire en la zona de estudio.
- Emitir recomendaciones para una adecuada divulgación y concientización de la importancia de la calidad del aire.

Hipótesis

Asumiendo la existencia de una relación entre los contaminantes criterio y las variables meteorológicas, precipitación, temperatura y velocidad del viento es posible identificar en qué casos habrá mayor o menor concentración de contaminantes y por ende un diagnóstico de la calidad del aire del área de estudio.

Capítulo I. Antecedentes

Contaminante criterio

Un contaminante es aquella sustancia presente en el ambiente en mayor concentración a la natural como resultado de la actividad humana, lo que ejerce un efecto pernicioso sobre este (Crespo, 2017), además de modificar sus características naturales del medio ambiente. Los contaminantes pueden clasificarse de acuerdo con su origen, si estos son liberados directamente a la atmósfera desde una fuente como chimeneas, vehículos, entre otros, se denominan *contaminantes primarios*. Dentro de los contaminantes primarios se encuentran óxidos de azufre (SO_x), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos y partículas.

Mientras que todos aquellos que son el resultado de las transformaciones y reacciones químicas de los contaminantes primarios en la atmósfera, se denomina *contaminantes secundarios*, dentro de estos contaminantes se encuentran contaminantes fotoquímicos como el ozono (O₃), la lluvia ácida y el formaldehído; los contaminantes secundarios a nivel de suelo dependen de sus precursores como son los NO_x, SO_x, la radiación luminosa, condiciones meteorológicas y la topografía (García J. , 2009).

Sin embargo, existen diversas clasificaciones de los contaminantes, una de ellas es, los *contaminantes criterio* que obtuvieron su nombre debido a que fueron objeto de evaluaciones científicas publicadas en el documento llamado “criterios de calidad del aire” por Air Quality Criteria en Estados Unidos (Environmental Protection Agency, 2018), los cuales son sustancias que son liberados en grandes cantidades a la atmósfera de diferentes fuentes y presentan un riesgo a la salud y al medio ambiente por su mayor abundancia en zonas urbanas. Dentro de esta clasificación se encuentran el ozono, material particulado, monóxido de carbono, dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno y plomo.

Estos contaminantes son de gran relevancia ya que son una forma de conocer la calidad del aire que se tienen en una zona, por esta razón se han determinado límites máximos permisibles para su estadía en la atmósfera.

Calidad del aire y normatividad

En México para el año de 1994 se establecieron las primeras normas por parte de la Secretaría de Salud para regular los contaminantes atmosféricos esto con el objetivo principalmente de disminuir las afectaciones a la salud, sobre todo al sector de la población

más vulnerable; niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias. Estas normas oficiales mexicanas fijan valores máximos permisibles de concentración de los contaminantes criterio presentes en las áreas urbanas por un tiempo delimitado (INECC, 2007). Para establecer estos límites máximos permisibles no se contaba, en aquel entonces con estudios toxicológicos y de exposición por lo que se establecieron utilizando límites propuestos por otros países, además, se tomó como referencia las concentraciones a las que los grupos sensibles de la población podían estar expuestos.

A continuación, se muestra en Tabla 1 las normas oficiales mexicanas para cada contaminante criterio y el límite máximo permisible de concentración de estos.

*Tabla 1 Normatividad Mexicana de contaminantes criterio para la salud pública
Fuente: Elaboración propia*

Contaminante	Norma Oficial Mexicana	Valor límite	Criterio de suficiencia anual
Ozono	NOM-020-SSA1-2014	0.095 ppm promedio máximo horario	Al menos 75 % de los datos horarios
		0.070 ppm máximo anual del promedio móvil de 8 horas	Al menos 75 % de los máximos diarios de los promedio móviles de 8 horas
Monóxido de Carbono (CO)	NOM-021-SSA1-1993	11 ppm segundo máximo anual como promedio móvil de 8 horas	Al menos 75% de los promedios móviles de 8 horas
Dióxido de Azufre (SO₂)	NOM-022-SSA1-2010	0.110 ppm máximo promedio de 24 horas	Al menos 75 % de los promedios de 24 horas
		0.200 ppm segundo máximo anual como promedio móvil de 8 horas	Al menos 75% de los promedios móviles de 8 horas
		0.025 ppm promedio anual	Al menos el 75% de los datos horarios
Dióxido de Nitrógeno (NO₂)	NOM-023-SSA1-1993	0.210 ppm segundo máximo promedio horario	Al menos 75 % de los datos horarios

Partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀)	NOM-025-SSA1-2014	75 µg/m ³ máximo promedio de 24 horas	Por lo menos tres trimestres con al menos 75% de los promedios de 24 horas válidas.
		40 µg/m ³ promedio anual	
Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5})	NOM-025-SSA1-2014	45 µg/m ³ máximo promedio de 24 horas	Por lo menos tres trimestres con al menos 75% de los promedios de 24 horas válidas.
		12 µg/m ³ promedio anual	
Plomo (Pb)	NOM-026-SSA1-1993	1.5 µg/m ³ en un periodo de tres meses como promedio aritmético	

Cabe destacar que el criterio de suficiencia anual o criterio de completación establecido por estas normas mexicanas e internacionales para la realización de una evaluación de calidad del aire establecen que se cumpla con un mínimo del 75 % de datos válidos, sin embargo, si no se cuenta con este porcentaje diversos autores optan por hacer un análisis de tendencias de la concentración del contaminante.

Al paso del tiempo algunas de estas normas han sido reformadas, no obstante, aún falta establecer límites permisibles más estrechos, para tener una mejor calidad del aire y con esto disminuir los efectos negativos de estos contaminantes atmosféricos tanto en la salud como en el medio ambiente. Esto se ve reflejado en los estándares de calidad del aire de países desarrollados como es el caso de Estados Unidos (Tabla 2) (Environmental Protection Agency, 2016), tienen límites permisibles más rigurosos para algunos contaminantes como son las PM_{2.5} y CO que México, de igual forma se puede ver la falta de rigurosidad en los límites permisibles en nuestro país al compararlos con los establecidos por la Organización Mundial de la Salud (Tabla 3) (Organización Mundial de la Salud, 2006).

*Tabla 2 Estándares de la calidad del aire en Estados Unidos
Fuente: Centro de Información sobre Contaminación de Aire de la EPA*

Contaminante	Valor límite (EPA)
Ozono	• 0.08 ppm promedio de 8 horas

	<ul style="list-style-type: none"> • 0.12 ppm promedio horario
Monóxido de Carbono (CO)	<ul style="list-style-type: none"> • 9 ppm promedio de 8 horas • 35 ppm promedio horario
Dióxido de Azufre (SO₂)	<ul style="list-style-type: none"> • 0.14 ppm promedio de 24 horas • 0.03 ppm promedio anual
Dióxido de Nitrógeno (NO₂)	<ul style="list-style-type: none"> • 0.053 ppm promedio anual
Partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀)	<ul style="list-style-type: none"> • 150 µg/m³ promedio 24 horas • 50 µg/m³ promedio anual
Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5})	<ul style="list-style-type: none"> • 35 µg/m³ promedio 24 horas • 12 µg/m³ promedio anual
Plomo (Pb)	<ul style="list-style-type: none"> • 1.5 µg/m³ promedio trimestral

Tabla 3 Estándares de calidad del aire establecidos por la OMS
Fuente: Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre.

Contaminante	Valor límite (OMS)
Ozono	<ul style="list-style-type: none"> • 100 µg/m³ (0.062 ppm) promedio de 8 horas
Dióxido de Azufre (SO₂)	<ul style="list-style-type: none"> • 20 µg/m³ (0.009 ppm) promedio de 24 horas • 500 µg/m³ (0.235 ppm) promedio de 10 min
Dióxido de Nitrógeno (NO₂)	<ul style="list-style-type: none"> • 40 µg/m³ (0.026 ppm) promedio anual • 200 µg/m³ (0.1307 ppm) promedio horario
Partículas menores a 10 micrómetros (PM₁₀)	<ul style="list-style-type: none"> • 50 µg/m³ promedio 24 horas • 20 µg/m³ promedio anual

Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM_{2.5})	<ul style="list-style-type: none"> • 25 µg/m³ promedio 24 horas • 10 µg/m³ promedio anual
--	---

Además de las normas mencionadas anteriormente, en México existen otras, establecidas por el gobierno federal a través de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, las cuales determinan los métodos recomendados para el monitoreo algunos de los contaminantes criterio, dentro de estas normas se encuentran:

- NOM-034-SEMARNAT-1993 para monitoreo de monóxido de carbono (CO)
- NOM-035-SEMARNAT-1993 para monitoreo de partículas suspendidas totales
- NOM-036-SEMARNAT-1993 para monitoreo de ozono (O₃)
- NOM-037-SEMARNAT-1993 para monitoreo de dióxido de nitrógeno (NO₂)
- NOM-038-SEMARNAT-1993 para monitoreo de dióxido de azufre (SO₂)

En el caso de las partículas menores a 10 micrómetros y menores a 2.5 micrómetros de diámetro, no se cuenta con una norma mexicana que establezcan un método de monitoreo para estos contaminantes por lo que se utilizan métodos equivalentes a los recomendados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) (Gobierno de La ciudad de México, 2016).

Estos límites máximos permisibles establecidos para los contaminantes criterio, ayudan a conocer la calidad del aire en una zona urbana. La calidad del aire es considerada como un conjunto de concentraciones de componentes presentes en la atmósfera en un periodo de tiempo determinado, que satisface la salud, el bienestar de la población, el equilibrio ecológico y el valor económico de los materiales (ProAire, 2012).

La calidad del aire que rodea una zona de estudio será el resultado de una combinación de diversos factores que producen cambios en la composición del aire, estos factores pueden ser diferentes en cada momento del día. Dentro de estos factores se pueden destacar tres, el primero son las condiciones meteorológicas, ya que estas determinarán el movimiento de las masas de aire, la facilidad o dificultad para la dispersión de contaminantes y las condiciones de estabilidad presente en la atmósfera. Otro factor relevante para la calidad del aire son las características geográficas del lugar de estudio, ya que de esta pueden depender la difusión o acumulación de los contaminantes. Finalmente, el tercer factor relevante es la fuente de emisión, debido a que la fuente puede ser desde un vehículo hasta

emisiones industriales, por lo tanto, el tipo de contaminantes que se liberaran a la atmósfera son diferentes (SEMARNAT, 2013) (García J. , 2009).

Es por esto que para realizar la evaluación y control de la calidad del aire se requiere conocimiento no solo de los contaminantes y sus efectos, sino, también del mecanismo de dispersión de estos contaminantes y de las características meteorológicas y topográficas del lugar (Traviño, 2000). Finalmente, para evaluar y asegurar una calidad de aire apta para la población y el medio ambiente se deben implementar correctamente las normas de calidad del aire tanto nacionales como internacionales.

De acuerdo con la NOM-156-SEMARNAT-2012, se debe llevar a cabo la vigilancia de la calidad del aire en las zonas o centro de población donde se cumplan algunas de las siguientes características:

- Asentamientos humanos con más de 500,000 habitantes
- Zonas metropolitanas
- Asentamientos humanos con emisiones superiores a 20,000 toneladas anuales de contaminantes criterios primarios a la atmósfera
- Conurbaciones
- Actividad industrial que por sus características requiera del establecimiento de estaciones

Además de los estándares para los límites máximos permisibles para conocer la calidad del aire en México existe un Índice Metropolitano de Calidad de Aire (IMECA), este permite de una manera directa y más fácil que la población conozca la calidad de aire que se tiene hora con hora en el lugar que se encuentran. Esta unidad de medida se creó específicamente para la Ciudad de México, sin embargo, existen otros estados como es el caso de Puebla que lo han implementado para informar a la población de la calidad de aire que se tiene.

El IMECA es un indicador que se encuentra integrado por los principales contaminantes criterio que son O₃, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, NO₂, CO (Montero, 2011), donde se le asignan valores del 0 al 500 a cada contaminante según sea el daño que puedan ocasionar a la salud. El cálculo del IMECA se realiza bajo la Norma Técnica Ambiental de la Ciudad de México (NADF-009-AIRE-2017); consiste en un algoritmo matemático mediante el cual se transforman las concentraciones de cada uno de los contaminantes a un valor IMECA (ProAire, 2012), de esta manera, se le asigna tanto un color como un valor IMECA al

contaminante y una categoría, donde se manifiesta la calidad del aire y las recomendaciones a seguir por la población.

Este índice de calidad ayuda a la elaboración de planes de acción para mejorar la calidad del aire en zonas urbanas de México, principalmente ya que más del 25 % de la población mundial vive en zonas de este tipo, es decir, una cuarta parte de la población mundial se expone diariamente a gases y partículas dañinas (Montero, 2011).

Efectos en la salud

Los contaminantes criterio tienen gran afectación en la salud humana, sin embargo, la afectación siempre estará asociado con el tiempo de exposición, el tipo de contaminante y la susceptibilidad del individuo expuesto (Crespo, 2017). Además, que cada contaminante afecta de manera diferente la salud humana, esto debido a que cada contaminante tiene un potencial distinto para producir daño de acuerdo con sus propiedades físicas y químicas.

Por otro lado, de acuerdo con (García, 2010) se considera que los factores fundamentales en los efectos de la salud causados por contaminantes atmosféricos son la magnitud de la exposición y la vulnerabilidad de la persona, donde la magnitud de exposición se refiere a la concentración del contaminante en la atmósfera durante una exposición y frecuencia determinada. Mientras que la vulnerabilidad nos establece que tan sensible es un individuo frente a estos contaminantes atmosféricos, esto dependerá principalmente de sus factores genéticos, su género, su edad y su nutrición.

La exposición a los contaminantes criterio puede ser aguda, es decir, exposición a altas concentraciones de un contaminante en un corto tiempo o exposición crónica, es decir, una exposición pequeña a lo largo de mucho tiempo. Por este motivo a continuación se exponen los efectos en el bienestar humano que pueden tener cada uno de los contaminantes criterio además de sus diversas fuentes de origen.

Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono es formado por la combustión incompleta de hidrocarburos y quema de biomasa (Potrillo, 2017) y puede provenir de fuentes naturales como emisiones volcánicas, plantas y actividad microbiana y fuentes antropogénicas que son principalmente los automóviles (Crespo, 2017). Se considera que los automóviles particulares producen cerca del 40 % de CO (Montero, 2011), este contaminante sale de los tubos de escape de los autos por lo que se generan altas concentraciones de este gas en áreas con congestión vehicular (Traviño, 2000).

Los principales efectos causados por exposición prolongada del CO en la salud son la interferencia con la habilidad de la hemoglobina de transportar el oxígeno, debido a que el CO es absorbido por la hemoglobina 200 veces más rápido que el oxígeno, por lo que la concentración de oxígeno se ve desplazada por monóxido de carbono (Crespo, 2017).

Los efectos del monóxido de carbono pueden ser desde pequeños hasta mortales para los seres vivos, con 100 ppm puede causar mareos, dolor de cabeza y cansancio, de igual forma inhalando en pequeñas cantidades puede causar hipoxia y daño neurológico. Mientras que con más de 750 ppm de concentración puede causar la muerte, además con una exposición de 8 horas a este contaminante se pueden ver afectadas las pruebas psicométricas y con una exposición alta causar fatiga psicológica. También puede afectar la capacidad del trabajo, la destreza manual y la habilidad para aprender. Dentro del sector más vulnerable al monóxido de carbono se encuentran los niños, ya que les puede causar problemas en el desarrollo de sus pulmones.

Ozono (O₃)

Este contaminante secundario es originado de las reacciones fotosintéticas que se llevan a cabo en la atmósfera entre los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV), el monóxido de carbono (CO) y los óxidos nítricos (Crespo, 2017) por lo que se presenta principalmente en mayor concentración en zonas pobladas con emisiones industriales (Potrillo, 2017).

El ozono causa problemas para respirar, ataques de asma, lesiones en el tejido pulmonar, irritación de ojos, nariz y garganta y contricción de pecho. Se han realizado estudios donde se ha determinado que las consultas por crisis de asma pueden aumentar más de 30 % si la concentración de ozono supera los 220 µg/m³ (Montero, 2011).

Puede causar un ataque oxidativo sobre lípidos y aminoácidos que alteran la función de estos. El sector más vulnerable de acuerdo con estudios realizados son los infantes debido a que se encontró una relación con el incremento de la mortalidad, de la morbilidad respiratoria, de la deficiencia pulmonar, de las crisis asmáticas y de las visitas médicas por causa de la exposición a este contaminante (ProAire, 2012).

Además de los efectos mencionados anteriormente el ozono al ser un gas muy reactivo junto con otros oxidantes fotoquímicos como el nitrato peroxacetilo (NPA) y el nitrato de perobencilo (NPA) reducen la visibilidad (Wark & Warner, 2012), es decir, la habilidad de nuestros ojos para distinguir un objeto sin confundirle con el fondo que lo rodea (Crespo, 2017).

Dióxido de Azufre (SO₂)

Este contaminante tiene diferentes fuentes de origen tanto naturales como antropogénicas, como son las erupciones volcánicas, brisa marina, incendios y los procesos de combustión que contienen azufre (Potrillo, 2017), es por esto que las ciudades con industrias proporcionan más de la mitad de contaminación por azufre a nivel mundial, además de que este contaminante se encuentra poco tiempo en la atmósfera a causa de la remoción y disminuye su concentración conforme te alejas de la fuente de origen (Crespo, 2017). Dentro de las mayores fuentes naturales se encuentra la oxidación de materia orgánica con azufre a reducción de sulfuro de hidrógeno (S₂H) en condiciones anaerobias (Montero, 2011).

Los principales efectos por altas concentraciones que tiene en la salud son irritación en vías respiratorias, tos, sensación de opresión en el pecho y agravamiento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, por otro lado (Wark & Warner, 2012) nos menciona que se puede desarrollar broncoconstricción con una concentración mayor a 5 ppm aunque algunos organismos sensibles la pueden desarrollar hasta con una concentración de 1 a 2 ppm, además a exposiciones moderadas el gas puede ser sofocante mientras que a mayores concentraciones de 20 ppm los efectos pueden ser graves. Durante una exposición corta de 10 minutos se pueden presentar síntomas de respiratorios asmáticos (ProAire, 2012). El dióxido de azufre es precursor de la lluvia ácida, que es causante de otros efectos, además que al combinarse con la humedad forman aerosoles precursores de partículas.

La combinación de los SO_x y las partículas suspendidas actúan sinérgicamente produciendo efectos mucho más nocivos que los que producen individualmente (Montero, 2011). Uno de estos efectos es la neblina atmosférica causada por reacción entre el SO₂, partículas y NO, por lo que se presenta una dispersión de la luz y se reduce la visibilidad.

Dióxido de Nitrógeno (NO₂)

Los óxidos de nitrógeno más presentes en la atmósfera son el óxido nitroso (N₂O), óxido de nitrógeno (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂) (Montero, 2011).

Este contaminante criterio proviene tanto de fuentes naturales como volcanes, océanos y rayos y de fuentes antropogénicas como quema de combustible, uso de explosivos y fertilizantes, sin embargo, el 70 % de este contaminante es originado por actividades

humanas (Crespo, 2017). El 75 % de estas fuentes antropogénicas se debe a la generación de energía eléctrica y a la petroquímica (García, 2010).

Algunos efectos dañinos a la salud que pueden ser causados por la exposición a este contaminante es la inflamación del tejido pulmonar, irritación de la piel, mortalidad por enfermedades cardiovasculares, y respiratorias (Potrillo, 2017), por otro lado, este gas a bajas concentraciones puede causar irritación de vías respiratorias, empeoramiento de bronquitis y pulmonía, además puede causar bronquitis con una concentración menor a 0.01 ppm (Wark & Warner, 2012).

Además de estos efectos, se pueden presentar daños agudos por una exposición corta de 1 hora con una concentración de 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que para una exposición de larga duración los efectos negativos pueden aumentar, esto se ve reflejado en estudio realizados en México que establecen que existe una relación entre la exposición crónica de NO_2 y la alteración en la función pulmonar de niños (ProAire, 2012).

Material Particulado (PM)

Las partículas se pueden clasificar en términos de calidad del aire, dentro de estas se encuentran las partículas suspendidas totales (PST), las partículas menores o igual 10 μm de diámetro (PM_{10}) y las partículas menores o igual a 2.5 μm de diámetro ($\text{PM}_{2.5}$). Dentro de las PST se encuentra cualquier material sólido o líquido con un diámetro de hasta 500 μm , estas tienen mayor facilidad para precipitarse debido a su tamaño, por lo que permanecen poco tiempo en la atmósfera, presentando un riesgo bajo para la salud. Mientras que las PM_{10} son más perjudiciales para la salud debido a que se quedan atrapadas en el sistema de limpieza del tracto respiratorio; estas partículas provienen de fuentes móviles principalmente vehículos de diésel. Finalmente, las $\text{PM}_{2.5}$ son las que causan mayor riesgo a la salud, debido a su capacidad de llegar a los alveolos pulmonares, por ende, es un factor de muerte prematura.

Las partículas pueden tener una composición fisicoquímica homogénea constituida por compuestos tanto por compuestos orgánicos como fenoles, ácidos, alcoholes, polen, bacterias y virus. Compuestos inorgánicos como son nitratos, sulfatos, polímeros, metales pesados (Montero, 2011). Estas partículas son originadas principalmente por quema de combustibles fósiles, uso de vehículos a diésel, centrales termoeléctricas e industrias, incendios forestales, erupciones volcánicas, polvo suspendido y polinización de plantas (Potrillo, 2017).

En general las partículas suspendidas pueden causar reducción de pulmones, irritación de ojos, boca, nariz, garganta, ataques de asma y nivel de energía reducido, además en una exposición a largo plazo puede causar bronquitis y enfermedades de obstrucción crónica y pulmonar (Crespo, 2017).

Además de los efectos mencionados anteriormente, las partículas también son responsables de la reducción de la visibilidad debido a los fenómenos de absorción y dispersión de luz por material sólido arrastrado por el aire (Traviño, 2000).

Sin embargo, se dice que las partículas suspendidas son los contaminantes más peligrosos debido a que causa un aumento drástico en la mortalidad, algunos estudios demuestran que un existe un aumento de 3 % en mortalidad por cada 10 mg/m³ de PM₁₀ (Vega & Martínez, 2004), además indican que el incremento de la mortalidad y morbilidad están asociados al nivel de concentración de partículas muy por debajo de los límites máximos establecidos (Crespo, 2017). Mientras que otros estudios de PM_{2.5} demuestran que estas partículas tienen la capacidad de entrar a los alveolos y al torrente sanguíneo incrementando así las enfermedades crónicas cardiovasculares (Montero, 2011).

En conclusión, los contaminantes criterio pueden causar diversos daños a la salud es por esto, que es, importante llevar a cabo acciones dirigidas a reducir las concentraciones de contaminación, ya que cuanto más se logre disminuir la contaminación atmosférica, mayores serán los beneficios para la salud, ya que se reduce la morbilidad por enfermedades respiratorias; debido a que la alta concentración de estos contaminantes criterio aumenta la tasa de mortalidad no solo en los periodos de alta concentración sino también durante toda la vida de estos contaminantes.

Además de que es importante que las diversas organizaciones gubernamentales encargadas del monitoreo de la concentración de estos contaminantes se aseguren que las concentraciones máximas de contaminantes en el ambiente no sobrepasen más de una vez por año los límites máximos permisibles, para que pueda garantizarse que se protege adecuadamente la salud de la población (Vallejo, 2015).

Efecto en plantas y materiales

Al igual que en los efectos a la salud causados por los contaminantes criterio, los efectos en las plantas y materiales van a depender del tiempo de exposición, el tipo de contaminante y la susceptibilidad que tenga la vegetación, así como los materiales, por lo que a continuación se presenta un resumen de los principales daños causados en plantas

y materiales. Además, en el caso de la vegetación se ha visto que cuando una planta crece en una zona afectada por un contaminante particular, la generación siguiente crece con una mayor resistencia a dicho contaminante, favoreciendo su vida a largo plazo (Crespo, 2017).

Monóxido de Carbono (CO)

El monóxido de carbono ha sido de los pocos contaminantes, no se tiene reportes de efectos negativos en los materiales, por otro lado, en la vegetación se tiene reportes de que esta no se ve afectada a una concentración por debajo de las 100 ppm de 1 a 3 semanas de exposición (Wark & Warner, 2012).

Ozono (O₃)

El ozono tiene efectos negativos en las plantas afectando su pared celular, reducción de su crecimiento, disminuyendo su actividad fotosintética y productividad en los cultivos, además de causar necrosis, que se manifiesta con puntos café entre las venas y las áreas planas de las hojas (Crespo, 2017).

Algunos cultivos que son sensibles a grandes concentraciones de ozono son la espinaca, frijol y tomates, además de que en estudios realizados se ha manifestado un retardo en el crecimiento de cítricos debido a este contaminante (Wark & Warner, 2012). De igual forma, el ozono junto con oxidantes fotoquímicos afectan las cosechas, la calidad de los productos agrícolas y con esto afectan indirectamente los servicios ambientales proporcionadas por las plantas y cultivos.

Por otro lado, el ozono causa efectos en materiales como el hule sintético, celulosa de textil; por esta razón es uno de los principales causantes de las decoloraciones de las telas (Wark & Warner, 2012).

Dióxido de azufre (SO₂)

Este contaminante criterio es el precursor de efectos en la vegetación como necrosis y clorosis en hojas de plantas (Potrillo, 2017), por lo que se generan áreas de aspecto blanqueado (Crespo, 2017). El dióxido de azufre ataca principalmente la zona del parénquima esponjoso de las plantas (Wark & Warner, 2012).

El límite de exposición establecido para este contaminante es de 0.3 ppm por 8 horas, esto para evitar que se causen daños perjudiciales a la vegetación. Dentro de los cultivos más sensibles a este gas son la alfalfa, el algodón, y la lechuga (Wark & Warner, 2012),

El dióxido de azufre al ser precursor de la lluvia ácida junto con los óxidos de nitrógeno, son los principales causantes del deterioro en materiales de construcción (Potrillo, 2017), de igual forma causa daños a la pintura fresca, acelera la corrosión de los metales de 1 a 5 veces y en algunos casos puede dañar las telas (Wark & Warner, 2012).

Al ser de los principales precursores de la lluvia ácida, se le pueden atribuir diversos daños al medio ambiente debido a la caída de partículas ácidas como son la degradación de suelo que se ve reflejada en la disminución del pH y la presencia de sulfatos ácidos en la composición del suelo. Otra afectación debida a la deposición de partículas ácidas, es el cambio de pH en cuerpos de agua, afectando los ecosistemas acuáticos por la reducción de peces. Finalmente, esta deposición ácida afecta a la vegetación donde se ve afectado su proceso de fotosíntesis, lesiones en las hojas de las plantas, además de disminuir su tolerancia ante enfermedades.

Dióxido de Nitrógeno (NO₂)

Los efectos en las plantas causados por este contaminante son principalmente lesiones blancas o cafés en el tejido intercostal y cerca del borde de la hoja (Crespo, 2017), disminución del crecimiento de algunos pastos e inhibición de la fotosíntesis (Potrillo, 2017). Al igual que el SO₂, este contaminante es responsable de la deposición ácida en suelos causando un deterioro químico a este por la presencia de NO_x procedentes de la contaminación atmosférica, además esta deposición ácida también afecta a cuerpos de agua causando un exceso de nitrógeno y dando pase a una eutrofización.

Además, si se tiene una exposición al dióxido de nitrógeno mayor a 0.5 ppm de 10 a 12 días podría causar detención del crecimiento en cultivos susceptibles como el frijol y el tomate (Wark & Warner, 2012).

Por otro lado el dióxido de nitrógeno no tiene efectos directos a los materiales pero si indirectos, al ser precursor de ácido nítrico el cual causa corrosión en los metales (Wark & Warner, 2012).

Material Particulado (PM)

En plantas no se tienen identificados daños causados por las partículas suspendidas (Wark & Warner, 2012).

Mientras que en los materiales tanto las partículas PM₁₀ y PM_{2.5} son causantes de la corrosión acelerada de los metales expuestos al ambiente, así como daños a pintura y esculturas (Potrillo, 2017).

Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica es un problema que comenzó desde los inicios del fuego, posteriormente se incrementó con la revolución industrial debido a la quema de combustibles fósiles, siendo hoy en día un severo problema causado por el crecimiento desmedido de la población y el parque vehicular de las zonas urbanas principalmente, además de las diversas actividades que se desarrollan día con día que contribuyen a este tipo de contaminación. Por este motivo, la contaminación del aire ha ido cobrando cada vez más importancia para diversos países, en México se han establecido diversas iniciativas para el comportamiento de los contaminantes atmosféricos y pronosticar sus concentraciones en un futuro (Montero, 2011).

La contaminación del aire es la presencia en la atmósfera de sustancias ya sea en forma de gas o partículas; que a largo, mediano o corto plazo causa efectos negativos a los seres humanos, animales, vegetación y daños materiales a edificaciones (Santos, 2009).

La contaminación atmosférica puede clasificarse de acuerdo con su origen, en, contaminación de origen natural y contaminación de origen antropogénico, la primera hace referencia a que proviene del medio ambiente como emisiones volcánicas, erosión del suelo y contaminantes provenientes de algunos procesos biogeoquímicos. Mientras que la contaminación antropogénica es llamada así por ser causada por diversas actividades realizadas por el hombre como quema de combustibles fósiles, generación de energía y procesos de refinación. De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones del 2008 el 79.3 % de la contaminación es de origen antropogénico y un 20.7 % de origen natural (SEMARNAT, 2013). La contaminación atmosférica puede variar principalmente con la topografía y clima del lugar, debido a que son factores determinantes para la distribución y procesos atmosféricos de los contaminantes y por ende de los efectos que tienen en el medio ambiente (Aguilar, 1998).

Por otro lado, algunos estudios consideran que la contaminación del aire representa el 6 % de la mortalidad total (ProAire, 2012), debido a que la contaminación atmosférica tiene importantes repercusiones en la salud humana que a su vez causa impactos económicos los cuales son traducidos a gastos médicos de tratamiento de enfermedades respiratorias.

Atmósfera

La atmósfera es una capa gaseosa que envuelve el planeta Tierra, está compuesta principalmente por nitrógeno (N_2) en un 78 % y oxígeno en un 21 % (O_2) (SEMARNAT,

2013), sus gases que la conforman se pueden dividir en gases fijos y gases traza. Los gases fijos tienen este nombre debido a que su número de moléculas no cambian respecto al tiempo o espacio, además de conformar el 99 % de la composición de la atmósfera, dentro de estos gases se encuentran el nitrógeno, oxígeno y argón (Ar). Mientras que los gases traza son llamados así debido a que su concentración es menor a 0.0001 %, es por esto que solo forman parte de la atmósfera en un 1 %, a pesar de su bajo porcentaje tienen un papel importante en los procesos meteorológicos. Dentro de los gases traza se encuentran el dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), Ozono (O₃) y el vapor de agua entre otros (Crespo, 2017); el vapor de agua es de los gases traza, más difícil de medir, sin embargo, tiene grandes repercusiones debido a que contribuye a la formación de la lluvia ácida y del efecto invernadero.

La atmósfera cumple principalmente dos funciones, la primera es que regular la temperatura de todo el planeta, impidiendo cambios bruscos de temperatura, debido a sus capacidades de reflejar y absorber cierta cantidad de energía proveniente del sol. Mientras que su segunda función es proteger de los rayos ultravioleta, ya que filtra la radiación UV por sus distintas capas, protegiendo así la vida en el planeta.

Estructura vertical de la atmósfera

La atmósfera verticalmente está conformada por cuatro capas principales; la tropósfera, la estratósfera, la mesósfera y la termósfera, estas tienen diferentes características, debido a que la composición química y la temperatura de la atmósfera varían en función de la altura (SEMARNAT, 2013) (Figura 1).

- **Tropósfera:** Es la capa de la atmósfera más cercana a la superficie terrestre, por ende, la de mayor importancia en la contaminación atmosférica, es conocida como capa sucia, constituye el 80 % de la masa total de la atmósfera, aquí se encuentra la mayoría del vapor de agua. Esta capa puede llegar a medir de los 8 Km de altura en los polos hasta los 18 km de altura en el ecuador, sin embargo, en promedio se considera que tiene una altura de 12 km. La tropósfera tiene poca capacidad para absorber energía solar, por lo que depende de la transferencia de energía del suelo para mantenerse a una temperatura estable, es por esto, que en esta capa conforme aumenta la altura la temperatura disminuye, a este gradiente de temperatura se le llama *gradiente térmico vertical*, que tiene un valor aproximado de 6 °C por km (Carrascal & Puigcerver, 2008).

En esta capa ocurren la mayoría de los fenómenos del clima y el tiempo, así como, la formación de nubes, la precipitación y la turbulencia, además de que en esta zona de la atmósfera se tiene una mayor concentración de contaminantes, es por esto que en tropósfera se encuentra una capa llamada capa fronteriza o capa límite donde surge la mezcla y dispersión de contaminantes.

En la cima de la troposfera aproximadamente a los 11 km de altura se encuentra la *tropopausa*, que es el límite entre la troposfera y la estratosfera (Crespo, 2017).

- **Estratósfera:** Es la capa de la atmósfera donde se encuentra cerca de 90 % de ozono terrestre, debido a que aquí se localiza la capa de ozono, tiene una altura aproximada de 50 km. En la estratósfera la temperatura desciende y posteriormente vuelve a ascender cerca de los 0 °C, se tienen una gran concentración de energía en esta capa debido a que los rayos del sol en su mayoría inciden en esta capa (Carrascal & Puigcerver, 2008).

Aproximadamente entre los 47 y 52 km se encuentra la *estratopausa* que es límite entre la estratósfera y la mesósfera (Crespo, 2017).

- **Mesósfera:** Esta capa de la atmósfera tiene una altura aproximada de 79 Km, la temperatura en la mesósfera tiene un comportamiento similar al de la tropósfera debido a que decrece por varios kilómetros y a partir del kilómetro 62 comienza a aumentar. Aproximadamente a los 80 Km, se ubica la *mesopausa*, que es el límite entre la mesosfera y la termosfera, (Crespo, 2017).

- **Termósfera:** Esta es la región más alta de la atmósfera también es llamada ionósfera, de aproximadamente 600 o 800 km de altura, esta capa tiene una densidad baja por lo que es considerada como vacío y su temperatura aumenta conforme aumenta la altura (Crespo, 2017).

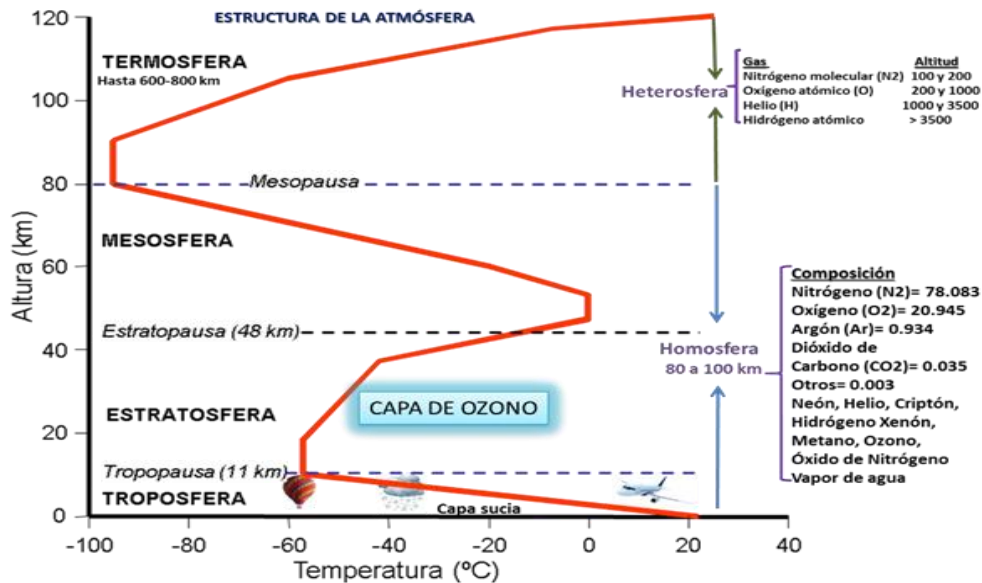


Figura 1 Capas de la atmósfera.
Fuente: Ministerio de Educación Ciencia y Tecnología

Capa límite planetaria

Capa límite planetaria o capa fronteriza es la capa inferior de la troposfera, afectada y modificada por procesos antropogénicos, tiene un espesor de entre 100 y 3000 m (Carrascal & Puigcerver, 2008). Esta capa tiene una escala temporal, esto debido a que depende del tiempo y condiciones meteorológicas (Crespo, 2017). Además, en esta capa ocurre la emisión, transporte y dispersión de los contaminantes, que son afectados por factores meteorológicos que se llevan dentro de esta capa fronteriza como son el viento horizontal, la estabilidad atmosférica, la inversión térmica y el movimiento de masas de aire en la vertical (Galindo, 1999), siendo este último el más importante debido a que son cruciales para el transporte y reacción de los contaminantes (Crespo, 2017).

Como se mencionó anteriormente la estructura de la capa límite planetaria cambia a lo largo del día. Sin embargo, esta se encuentra constituida principalmente por otras capas que son:

- **Capa superficial:** Es la región más baja de la capa fronteriza, por lo tanto, es la que está en más contacto con la superficie terrestre, no es fácil de medir, por lo que al 10 % inferior de la capa límite planetaria se le conoce como capa superficial (Galindo, 1999).
- **Capa de mezcla:** Esta capa abarca desde la capa superficial hasta la zona de entrada, es decir, hasta donde los contaminantes se encuentren dispersos, su altura

máxima se presenta alrededor de las 12 horas y comienza a crecer después de media hora del amanecer debido al calentamiento por la radiación solar. Esta capa es de gran importancia, debido a que en ella se lleva a cabo la dispersión de contaminantes a diferentes horas del día, además lo que suceda en la capa de mezcla repercute en la superficie terrestre, no siendo así las emisiones por arriba de esta capa no tienen repercusiones en la superficie terrestre (Galindo, 1999).

El espesor de la capa de mezcla está relacionado con diversos factores meteorológicos, principalmente con la radiación solar ya que, esta calienta el suelo y los contaminantes comienzan a subir por convección haciendo que la capa de mezcla aumente de tamaño (Carrascal & Puigcerver, 2008). Otro factor meteorológico de afectación para el crecimiento de la capa de mezcla es la capa de nubes, si se tiene una capa de nubes muy densa esto reducirá la intensidad de insolación lo cual indica una disminución de temperatura por lo que los contaminantes no presentaran convección, causando un menor crecimiento en la capa de mezcla (Galindo, 1999).

Existen algunos factores antropogénicos que afectan el espesor de la capa de mezcla como son las fuentes de contaminación cerca de la superficie terrestre causan un aumento en el espesor de esta capa (Galindo, 1999). Por otro lado, en esta capa se presentan turbulencias causadas por la interacción del viento con la rugosidad superficial (Pérez, 2010).

- **Capa residual:** Esta capa no tiene contacto con la superficie terrestre, se presenta media hora antes de anochecer, formada debido a que las parcelas de aire caliente ascienden y se concentran los contaminantes que no son removidos a lo largo del día (Galindo, 1999), estos contaminantes quedan en espera, para al día siguiente puedan formar parte de la capa de mezcla y se puedan dispersar o remover de la atmósfera.
- **Capa límite estable:** Esta capa es una porción de la capa residual que al tener contacto con la superficie terrestre se vuelve en capa límite estable, esta capa no tiene un grosor definido, simplemente termina donde comienza la capa residual (Galindo, 1999).

A continuación, se observa la Figura 2 con la representación de la capa límite planetaria a lo largo del día para un mejor entendimiento.

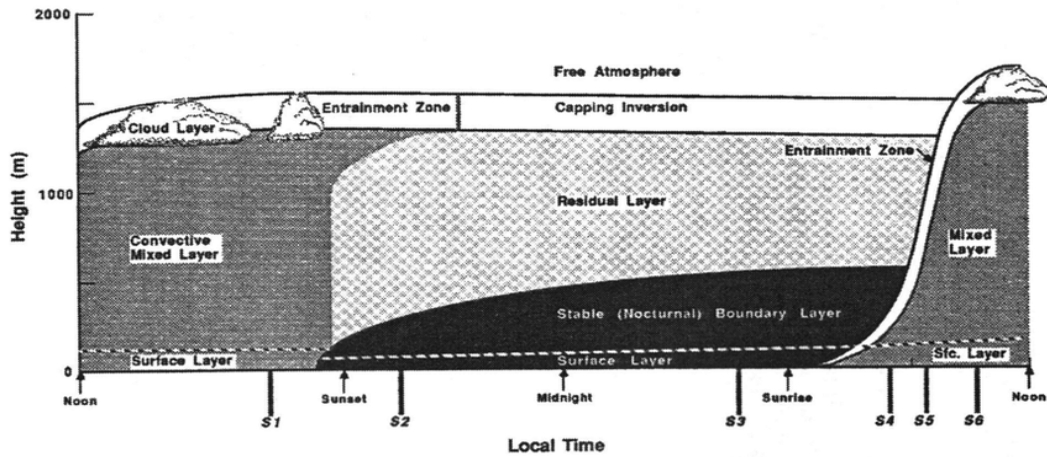


Figura 2 Esquema de la capa límite planetaria.
Fuente: Librería de Software de procedimientos meteorológicos para modelos dispersión de contaminantes

Escala de la atmósfera

La atmósfera está constituida por la microescala, mesoescala, escala sinóptica y escala planetaria. Esta escala también es utilizada para clasificar de acuerdo con su extensión horizontal en la atmósfera las características topográficas y condiciones meteorológicas (Sánchez, 1999). A continuación, se presenta la Tabla 4 donde especifica las características de la escala de la atmósfera.

Tabla 4 Escala horizontal de la atmósfera
Fuente: Elaboración propia

Escala	Dimensión	Escala temporal	Fenómenos
Microescala	2 Km	Segundos- minutos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Remolinos ▪ Evaporación de agua ▪ Contaminación atmosférica
Mesoescala	Gama 2-20 Km Beta 20-200 Km Alfa 200-2000 Km	Horas - días	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Corrientes en chorro ▪ Tornados ▪ Huracanes
Escala sinóptica	1000-1500 Km	Días- 2 semanas	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sistemas frontales

			<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ondas tropicales ▪ Vaguada ▪ Ciclones
Escala planetaria o macroescala	Global	Meses- 1 año	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fenómeno del Niño y la Niña

Es importante mencionar que las escalas en las que se presenta mayormente la contaminación atmosférica es en la escala sinóptica, la microescala y la mesoescala (Sánchez, 1999), esta concentración de contaminantes se verá afectada por diversos factores principalmente del viento y la temperatura.

Dispersión de contaminantes

Es el comportamiento que tienen los diferentes contaminantes en la atmósfera, es decir, la forma en que se van a transportar a lo largo de esta, además del tiempo que se quedan suspendidos en la atmósfera. La dispersión de los contaminantes va a depender de las fluctuaciones de las variables meteorológicas, de las fuentes de emisión que estén en la zona de estudio (Pérez, 2010) y de las condiciones topográficas locales.

La dispersión se puede llevar a cabo por cuatro mecanismos diferentes, uno de ellos es el *transporte de advección*, donde el desplazamiento horizontal de la masa de contaminantes se incorpora al movimiento de la masa de aire. Otro mecanismo es el *transporte por convección*, que es un desplazamiento vertical de la masa de contaminante incorporada al movimiento de la masa de aire. De igual forma existe dispersión por medio de la *difusión molecular*, que se refiere a un movimiento aleatorio por la agitación térmica de las moléculas de los contaminantes y finalmente por *difusión turbulenta* donde de las masas de contaminantes presentan un movimiento aleatorio debido al movimiento al azar de las masas de aire por tanto los contaminantes se dispersan (Pérez, 2010), en este último mecanismo es importante recalcar que se pueden presentar turbulencias mecánicas o turbulencias térmicas, la primera es causada por las variaciones de velocidad y dirección del viento, mientras que las segundas se deben a calentamiento diurno. La dispersión y transportes de contaminantes se presenta a diversas escalas, puede ser de manera local, regional y global.

La *dispersión local* se presenta principalmente en áreas urbanas, debido a las altas concentraciones de contaminantes en los tráficos matutinos, esta concentración dependerá de la reactividad de los contaminantes, así como de la capa de mezcla durante las primeras horas de la mañana (Potrillo, 2017). Por otro lado, la *dispersión regional* se presenta cuando en atmósfera se encuentran contaminantes con remoción lenta como el monóxido de carbono, las partículas y el ozono, en esta dispersión los contaminantes se pueden transportar de 10 a 100 km (Potrillo, 2017), llegando a zonas aledañas, donde se emitió originalmente los contaminantes. Finalmente, la *dispersión global* se presenta cuando se tienen contaminantes que permanecen años en la atmósfera, un ejemplo de esto son las especies que participan en el efecto invernadero como son el dióxido de carbono y el metano (Potrillo, 2017), además que son capaces de transportarse por largas distancia.

La dispersión de los contaminantes es un fenómeno complejo debido a que se ve afectado por diversos factores entre ellos se encuentran (Pérez, 2010):

- La naturaleza física y química de las sustancias
- Las características meteorológicas de la región (viento, estabilidad atmosférica, radiación solar y precipitación)
- La ubicación de las chimeneas respecto a los vientos predominantes
- La tasa de emisión de contaminantes
- La temperatura y velocidad de salida de los efluentes de las chimeneas
- Tipo de terreno

Factores de dispersión de los contaminantes

Como ya se mencionó anteriormente existen diversos factores que influyen en la dispersión de los contaminantes, sin embargo, dentro de los principales factores se encuentran algunas *variables meteorológicas* como el viento, radiación solar y precipitación que cumplen un papel importante en la distribución espacial de los contaminantes (ProAire, 2012), además de estas se encuentran factores como la *estabilidad atmosférica* la cual es una condición de la atmósfera, y la *topografía*.

Para fines de esta investigación, los factores que se muestran a continuación son considerados los más relevantes.

- **Viento:** Este es una variable meteorológica que facilita la dispersión de los contaminantes, su velocidad y dirección permiten conocer el desplazamiento de masas de contaminantes y por ende la zona expuesta (Sánchez, 1999). Causa una

disminución de los contaminantes, debido a que se desplazan y diluyen las masas de aire en función de la temperatura y de la presión (Pérez, 2010).

El comportamiento de los contaminantes frente a este dependerá de la velocidad del viento, es decir, al presentar una mayor velocidad se reducirá la cantidad de contaminantes a nivel de suelo (ProAire, 2012), mientras que si se presenta viento en calma, se tendrá una mayor dificultad para diluir los contaminantes y por tanto la concentración de estos incrementa (Sánchez, 1999).

- **Estabilidad Atmosférica:** Es la capacidad de la atmósfera de resistir o suprimir el movimiento en la vertical, se utiliza para explicar cualitativamente la facilidad de la atmósfera para diluir contaminantes (Galindo, 1999). La estabilidad de la atmósfera puede ser estable, inestable, neutra e inversión térmica.

La inestable favorece la dispersión de contaminantes, se presenta cuando se intensifica el movimiento vertical del aire causando que los contaminantes puedan dispersarse por convección, esta convección puede ser llana donde no se remueven tan rápidamente los contaminantes, o convección profunda donde los contaminantes son removidos más rápidamente.

Mientras que la *estable* frena la dispersión de los contaminantes debido a que no da paso a la convección, se presenta cuando el aire de la parcela es más frío y denso que el aire que la rodea. La estabilidad atmosférica *neutra* no favorece, ni frena la dispersión de los contaminantes y se presenta en días con viento y nubes que inhiben el calentamiento diurno o enfriamiento nocturno.

Finalmente, la *inversión térmica*, es la condición menos favorable de la estabilidad atmosférica debido a que causa que los contaminantes queden atrapados entre masas de aire caliente, se presenta cuando el gradiente térmico vertical se invierte, es decir, la temperatura aumenta con la altura, causando que debajo de la inversión las masas sean frías y densas por lo que no permiten elevarse los ni a estas masas ni a los contaminantes por encima del aire cálido de la zona de inversión (Potrillo, 2017).

- **Precipitación:** Esta variable meteorológica es un factor que favorece la formación de los contaminantes secundarios como ejemplo la lluvia ácida, sin embargo, tiene aspectos muy positivos, ya que contribuye a la remoción de contaminantes, aunque

lo deposita en agua y suelo en su gran mayoría, además disminuye la probabilidad de suspensión de material particulado (Potrillo, 2017).

- **Radiación solar:** Es una variable meteorológica fundamental de la fotoquímica atmosférica y establece las condiciones de estabilidad atmosférica (Cabrera, 2008), además, al igual que la precipitación contribuye a la formación de contaminantes secundarios como el ozono y el dióxido de nitrógeno (Potrillo, 2017), también puede contribuir a la inversión térmica nocturna.
- **Temperatura y Presión:** Estas variables meteorológicas son factores de dispersión de contaminantes que están relacionados directamente con la estabilidad atmosférica, la temperatura por su parte da las condiciones óptimas para el tipo de estabilidad que se va a tener de acuerdo con las condiciones a las que se enfrente el gradiente térmico vertical; por otro lado, la presión atmosférica al aumentar causará una atmósfera estable y como consecuencia una alta concentración de contaminantes, mientras que una baja presión atmosférica, causará una atmósfera inestable y por ende una mejor dispersión de los contaminantes.
- **Topografía:** Debido a que la topografía es un factor del clima se decidió agregar esta como un factor debido a que tiene grandes repercusiones en la dispersión de los contaminantes, además de una inter relación con los factores meteorológicos mencionados anteriormente. Este factor es determinante para el movimiento que presentaran los contaminantes de acuerdo con los límites que presenten, que están asociados las edificaciones y rugosidad de la superficie terrestre de la zona de estudio. Cuanto más caótico sea existirán mayores obstáculos para la transportación de los contaminantes.

Finalmente, se puede concluir que todos estos factores mencionados anteriormente determinan el tiempo de vida de los contaminantes, la distancia en la que viajan y las concentraciones que se encontraran en la atmósfera (Crespo, 2017). El tiempo de vida en la atmósfera determinará el nivel de impacto en la salud de los seres vivos y en el medio ambiente, el tiempo de vida puede ser menor, medio o mayor. En el menor tiempo de vida se encuentran los contaminantes con mayor reactividad química como el nitrato (NO_3) y el hidróxido (OH), mientras que los contaminantes de vida media son contaminantes que pueden durar desde segundos hasta meses en la atmósfera,

además de que se pueden transportar desde una escala local hasta la mesoescala, por otro lado los contaminantes con mayor tiempo de vida son aquellos que tienen una gran estabilidad química como el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O); estos tipos de contaminantes puede transportarse por varios kilómetros (Santos, 2009).

Deposición de contaminantes

En el ciclo de la calidad del aire está conformado por tres etapas, donde primera etapa es la contaminación, cuando el contaminante es emitido, posteriormente la dispersión e inhibición de estos y finalmente la deposición o remoción de los contaminantes que se encuentran en la atmósfera.

Las formas de deposición pueden ser por deposición seca y por deposición húmeda. *La deposición seca* se presenta por ausencia de precipitación pluvial, los gases y partículas son transportados por el viento a la superficie de la tierra (Santos, 2009), es importante que este tipo de remoción no se confunda con la sedimentación, esta sucede cuando las partículas caen debido a su masa, mientras que en la deposición seca las partículas se impactan en una superficie y quedan adheridas o reaccionan con esta superficie (Crespo, 2017). La eficacia de este tipo de deposición depende del tamaño del contaminante, la interacción con el viento (Crespo, 2017) y de la afinidad entre el contaminante y el material de la superficie a donde queda depositada (Santos, 2009). En el caso específico de las partículas después de ser depositadas en una superficie estas se pueden re suspender por la fricción del viento con la superficie terrestre.

Por otro lado, *la deposición húmeda* es el proceso mediante el cual los contaminantes son depurados por las reacciones químicas en las nubes o bien por la absorción en las gotas de lluvia (Santos, 2009).

Para las partículas el tipo de remoción a la que se presentan va a depender del tamaño, es decir, si son grandes quedan sujetas a la fuerza de gravedad mientras que si son finas pueden quedar suspendidas en la atmósfera por días hasta ser removidas por lluvia (Santos, 2009).

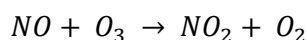
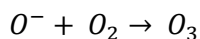
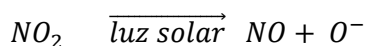
Finalmente, es importante tomar en cuenta que hoy en día con la tasa de emisiones que se liberan a la atmósfera procedentes de diferentes actividades antropogénicas, no logran ser removidos en su totalidad naturalmente, por ende, es cabe recalcar que no solo basta con la remoción de los contaminantes, sino que es importante implementar estrategias para reducir las emisiones de estos.

Química de los contaminantes

La concentración de los contaminantes criterio en la atmósfera además de depender de las formas de dispersión y deposición, también se ven influenciada por las reacciones químicas que se dan entre los contaminantes y las variables meteorológicas, esto se debe a que la atmósfera es un medio oxidante que recibe energía solar y contienen sustancias químicas de alto poder oxidante dando paso a diferentes reacciones químicas. Por lo que se describe a continuación, la química de cada uno de los contaminantes criterios.

Química del Ozono

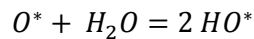
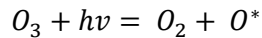
El ozono es uno de los contaminantes criterio más sensible a la radiación que llega a la tropósfera, causante de diferentes reacciones químicas, es importante recordar que el ozono proviene principalmente del dióxido de nitrógeno esto debido a que cada molécula de ozono requiere de un oxígeno proveniente del NO_2 , además que esto nos asegura que la concentración de ozono nunca será mayor a la del dióxido de nitrógeno por ser su precursor (Spiro & Stigliani, 2004), a continuación se muestran las reacciones químicas que para la formación del ozono y para encontrarse en equilibrio con el NO_2 en la atmósfera (Aránguez & Ordóñez, 1999), es decir, del ciclo fotolítico (Sánchez, 1999).



Existen algunas reacciones que producen dióxido de nitrógeno sin destruir el ozono alterando el equilibrio y provocando aumento del ozono, estas reacciones se presentan principalmente al intervenir en el ciclo fotolítico con la oxidación de los COV (Aránguez & Ordóñez, 1999), es decir, él NO reacciona con los COV el lugar de reaccionar con el ozono impidiendo que este se disocie aumentando la concentración del ozono (Sánchez, 1999).

Algunas de las condiciones meteorológicas que favorecen las reacciones químicas para la formación del ozono son, temperaturas entre los 27-32 °C, abundante presencia de luz solar y ausencia de viento, dichas condiciones se presentan en verano, por lo que en esta época del año aumenta la concentración de este contaminante, sin embargo, en invierno al no presentarse este escenario, el ozono se forma debido a la presencia de óxidos de nitrógeno y oxígeno molecular en la atmósfera (Aránguez & Ordóñez, 1999).

El ozono causa radicales libres en la atmósfera, principalmente radicales hidroxilos, producidos continuamente en la atmósfera debido a la radiación solar sobre el ozono, como se muestra en las siguientes reacciones:



El oxígeno se mantiene estable poco tiempo en la tropósfera lo que causa la formación de los radicales hidroxilos, posteriormente estos pueden reaccionar con el dióxido de azufre o de nitrógeno del ambiente para la formación de ácidos (Spiro & Stigliani, 2004).

Química de las Partículas

En el caso de las partículas es importante comenzar recordando que estas se componen principalmente de sulfatos, nitratos, amonio y material geológico que son polvos de óxidos de aluminio, sílice y calcio (INECC, 2007), por lo que las partículas no se ven afectadas directamente por reacciones químicas sino más bien sus precursores son los que se ven afectados por reacciones químicas.

Sin embargo, las partículas si afectan el balance de la radiación terrestre (Spiro & Stigliani, 2004) esto debido a que ellas absorben o reflejan la radiación solar que llega a la Tierra, esto determinará la velocidad de las reacciones fotolíticas y por ende la formación de algunos contaminantes criterio como se describió anteriormente (INECC, 2007).

El efecto de las partículas sobre el flujo energético de la atmósfera va a depender de la composición y tamaño de estas, las partículas grandes y oscuras absorben la luz causando que la atmósfera se caliente, mientras que las pequeñas dispersan la luz, favoreciendo el albedo terrestre, que es la radiación solar que es devuelta a la atmósfera después de incidir con la superficie terrestre (Spiro & Stigliani, 2004).

Además, debido a la absorción o dispersión de la radiación solar por parte del material sólido se verá afectada la visibilidad (Traviño, 2000).

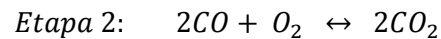
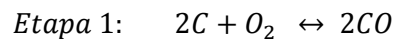
Sin embargo, es importante hablar de la evolución de las partículas cuando se encuentran en la atmósfera, las partículas sin importar su tamaño terminan depositándose en la superficie terrestre, a través de dos mecanismos la deposición seca y la deposición húmeda, donde alrededor del 20 % las partículas presentes son eliminadas por la deposición seca, mientras que el resto es eliminado por la deposición húmeda. De igual forma algunas partículas causan la lluvia esto debido a que son solubles en agua por lo que

se condensan con facilidad y forman pequeñas gotas de lluvia (Orozco, Pérez, González, & Francisco, 2003).

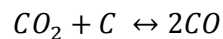
Química de Monóxido de Carbono

El monóxido de carbono se origina principalmente por tres tipos de reacciones diferentes, que son la combustión incompleta que contenga carbono, la reacción entre el dióxido de carbono y el carbono proveniente del combustible aún no quemado y por la disociación del dióxido de carbono a altas temperaturas.

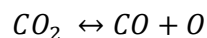
La combustión incompleta es de las tres reacciones la causante de la gran mayoría del monóxido de carbono, esta reacción se lleva a cabo en dos etapas, donde en la primera etapa la velocidad de reacción es mayor que la de la segunda, lo que significa que sin la presencia necesaria de oxígeno no se lleva a cabo la segunda etapa, causando un incremento en la concentración del CO. A continuación, se muestran las dos etapas (Orozco, Pérez, González, & Francisco, 2003):



La reacción entre el dióxido de carbono y en carbono proveniente del combustible que aún no ha sido quemado se lleva a cabo a temperaturas altas, esta reacción se presenta principalmente en los procesos industriales (Orozco, Pérez, González, & Francisco, 2003):



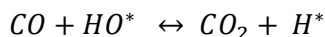
Finalmente, la disociación del dióxido de carbono a altas temperaturas, se presenta a pesar de que exista el oxígeno suficiente para que se lleve a cabo una combustión completa, esto debido a que a altas temperaturas la constante de equilibrio del proceso de descomposición del CO₂ aumenta (Orozco, Pérez, González, & Francisco, 2003).



No solo deben ser consideradas las reacciones para la formación del contaminante, sino también las reacciones una vez que el contaminante ya se encuentra en la atmósfera, para el monóxido de carbono se presenta principalmente dos formas en la que evoluciona en la atmósfera, estas son por medio de la oxidación y de la eliminación biológica.

En el caso de la oxidación de CO a CO₂, se lleva por medio de radical hidroxilo debido a que es el oxidante más importante en la tropósfera (Vega J. C., 2007), este radical proviene

de la descomposición fotoquímica del ozono y la reacción del oxígeno proveniente del vapor de agua.

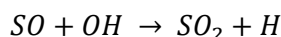
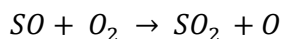


Mientras que la eliminación biológica del monóxido de carbono se debe a la absorción de este contaminante por parte de algunos hongos y plantas como forma de nutrirse, la tasa de absorción puede ir desde 7 mg CO/h m² suelo a 109 mg CO/h m² suelo dependiendo de la especie (Orozco, Pérez, González, & Francisco, 2003).

Química del Dióxido de Azufre

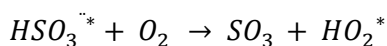
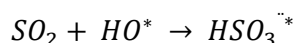
Los óxidos de azufre provienen principalmente de la combustión de derivados del carbono y del petróleo (Vega J. C., 2007), sin embargo, la emisión de este contaminante dependerá del combustible, la instalación de la fuente y los controles que se tengan (Wark & Warner, 2012).

El dióxido de azufre se forma principalmente de dos reacciones que se muestran a continuación:

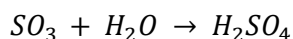


Estas reacciones se llevan a cabo debido a que el SO es inestable y reactivo a temperatura ambiente, mientras que el SO₂ y el SO₃ son estables (Wark & Warner, 2012) otro factor importante para que se forme dióxido de azufre es la temperatura alta, debido a que altas temperaturas el trióxido de azufre es inestable, por lo que a estas condiciones se favorece la formación de SO₂ (Orozco, Pérez, González, & Francisco, 2003).

Después de su formación y a pesar de ser estable el dióxido de azufre se oxida en ácido sulfúrico y sales, sin embargo, al igual que los demás contaminantes esta oxidación va a depender de la temperatura, la luz solar y la humedad, a continuación se muestran las reacciones químicas (Vega J. C., 2007):

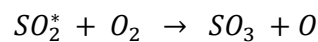
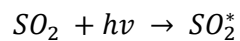


La hidrolisis del SO₃ dependera de la humedad en el ambiente



Este ácido sulfúrico resultado de la oxidación será el responsable posteriormente de la lluvia ácida junto con el ácido nítrico. Además, este contaminante criterio también afecta la visibilidad, debido a que forma aerosoles que absorben o dispersan la radiación, la desaparición del SO₂ para la formación de aerosoles aumenta cuando el SO₂ es fotooxidado en presencia del NO y HO (Wark & Warner, 2012).

Otra forma de evolución del dióxido de azufre durante su estancia en la atmósfera, es por medio de la fotooxidación directa donde se presentan las siguientes reacciones (Orozco, Pérez, González, & Francisco, 2003):

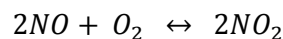
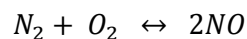


Donde se puede observar que la fotooxidación directa va a favorecer la formación del SO₃, sin embargo, su permanencia en la atmósfera dependerá de la temperatura.

Química de Dióxido de Nitrógeno

A pesar de que, en este apartado, solo se vaya a abordar en dióxido de nitrógeno este contaminante criterio pertenece a un grupo denominado óxidos de nitrógeno, que engloba él NO, NO₂ y N₂O debido a que estos son los óxidos más estables en la atmósfera, además de ser parte esencial del ciclo del nitrógeno (Wark & Warner, 2012)

El dióxido de nitrógeno es originado por la combustión de hidrocarburos en fuentes móviles o fijas, de este proceso de combustión se derivan principalmente dos reacciones que se muestran a continuación (Orozco, Pérez, González, & Francisco, 2003):

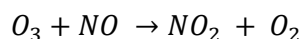
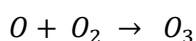
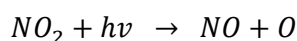


La primera reacción se ve favorecida a temperaturas más altas de entre 1300 a 2500 °C (Orozco, Pérez, González, & Francisco, 2003), por lo que se presenta una mayor concentración de NO, mientras que la concentración del NO₂ disminuye a altas temperaturas, esto debido a que el dióxido de nitrógeno se disocia formando monóxido de nitrógeno (Wark & Warner, 2012), mientras que la segunda reacción dará pie a la formación del ácido nítrico (Spiro & Stigliani, 2004).

Es importante que no solo se debe considerar las reacciones para la formación del contaminante, sino también las reacciones una vez que el contaminante ya se encuentra

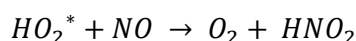
en la atmósfera, para el dióxido de nitrógeno existen diferentes formas de evolucionar durante su estancia en la atmósfera.

Una de ellas es el ciclo fotolítico de los óxidos de nitrógeno del cual el NO_2 es parte, donde se establece que el dióxido y monóxido de nitrógeno se forman simultáneamente en la atmósfera todo el tiempo (Vega J. C., 2007), además de que la relación que hay entre estos dos óxidos siempre dependerá de la cantidad de ozono en el ambiente, por lo que a su vez la relación NO_2/NO será un precursor importante del ozono.

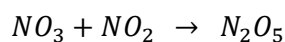
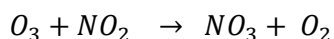


Si este ciclo fotolítico no intervinieran otros compuestos en particular hidrocarburos, las concentraciones del monóxido de nitrógeno y del dióxido de nitrógeno siempre estarían en un constante equilibrio (Orozco, Pérez, González, & Francisco, 2003).

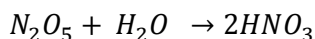
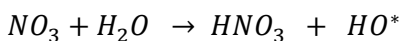
Otra forma de evolución del dióxido de nitrógeno va a ser de acuerdo con las especies químicas que se encuentren en la atmósfera durante el día y durante la noche. Durante el día los radicales que forman parte de la oxidación del NO_2 son los hidroxilos y los hidroperoxilos, donde la velocidad de reacción de estas reacciones siempre es menor que la del ciclo fotolítico, lo que permite que se lleven a cabo (Orozco, Pérez, González, & Francisco, 2003).



Mientras que por la noche la oxidación se lleva a cabo por el ozono, donde se originan trióxidos de nitrógeno y debido a que estos compuestos son altamente fotolíticos solo se pueden llevar en ausencia de radiación solar que es por la noche (Orozco, Pérez, González, & Francisco, 2003).



El trióxido de nitrógeno por medio de hidrolisis contribuye a la formación del ácido nítrico que posteriormente sufre una deposición de lluvia ácida o nitratos que forman partículas (Vega J. C., 2007).



Modelos de Dispersión

Los modelos de dispersión son expresiones matemáticas de los efectos de la atmósfera sobre los contaminantes del aire, los principales efectos que se toman en cuenta para desarrollar estos modelos matemáticos son la advección, la dispersión y las transformaciones físicas y químicas de los contaminantes (Aguilar, 1998).

Estos modelos son herramientas fundamentales para conocer la variación de la concentración de los contaminantes de acuerdo con la distribución de sus fuentes y su transporte dentro de la atmósfera, además, que son utilizados para predecir y analizar la calidad del aire de una zona de estudio (Cabrera, 2008).

Los propósitos de estos modelos de dispersión son el desarrollo de estrategias de control de emisiones, la evaluación de la calidad del aire y la selección de la mejor ubicación de estaciones de monitoreo.

Para poder desarrollar estos modelos se necesita conocer información específica de las fuentes de emisión como el tipo de contaminantes que se emiten, altura y diámetro de la chimenea, la temperatura y presión a la que salen los contaminantes, la velocidad y dirección de los vientos predominantes y la topografía del lugar (Cabrera, 2008).

Monitoreo Atmosférico

El monitoreo atmosférico es un conjunto de metodologías para muestrear, analizar y procesar la concentración de contaminantes presentes en el aire (Potrillo, 2017). Además, de que contribuye a la determinación y evaluación de la calidad del aire de una región.

El monitoreo continuo de contaminantes criterio, ayuda a la determinación de la calidad del aire de una zona a partir de su comportamiento contra los niveles permisibles establecidos para proteger la salud de la población, por esta razón en México constituye una herramienta importante en el Programa de Gestión de la calidad del aire (ProAire, 2012).

El monitoreo atmosférico se divide en dos pasos principales el *muestreo* donde los contaminantes son colectados y el *análisis* donde se determina a través de ciertos métodos específicos para cada tipo de contaminante la concentración de estos. Los métodos de muestreo y análisis se pueden clasificar en *métodos continuos* o de respuesta directa, estos combinan el muestreo y el análisis en una sola etapa. La otra clasificación son los *métodos integrados* o al azar, este tipo de métodos requieren de la complementación de métodos analíticos (Sánchez, 1999).

Estaciones de monitoreo atmosférico

Las estaciones de monitoreo cuentan con instrumentos para medir de forma continua la concentración de los contaminantes en la mayoría de los casos de los contaminantes criterio, además de contar con equipo para medir ciertas variables meteorológicas (ProAire, 2012), que permiten determinar las condiciones meteorológicas que conducen o acompañan altos niveles de contaminación. Los elementos principales de una estación de monitoreo atmosférico son (Figura 3) (Potrillo, 2017):

- Caseta
- Fuente de alimentación eléctrica
- Aire acondicionado para mantener un ambiente óptimo para los equipos
- Sistemas de toma de muestra como motor aspirador y tubo colector multipuertos
- Analizadores automáticos de gases criterio y monitoreo de partículas suspendidas
- Sensores meteorológicos para determinar velocidad y dirección del viento, presión, temperatura, humedad y precipitación
- Sistemas de calibración, sistema de acopio de datos
- Conexión a internet

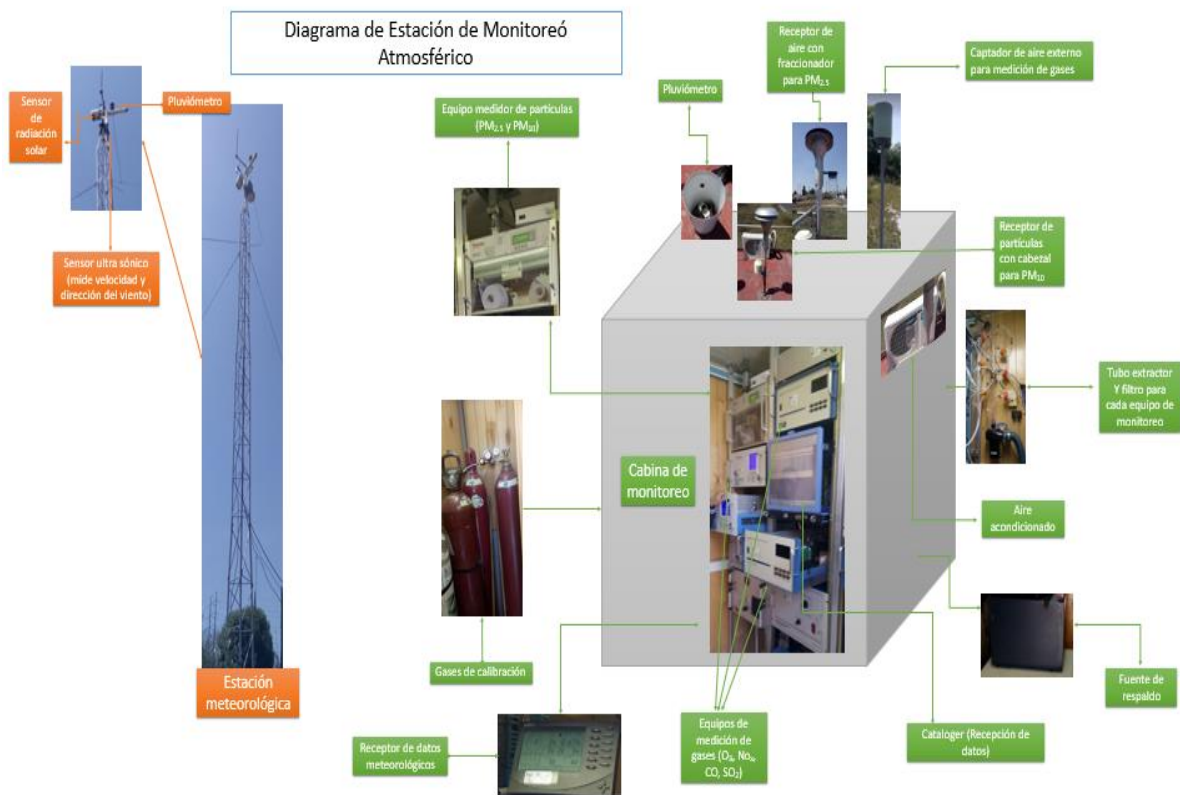


Figura 3 Diagrama de estación de monitoreo atmosférico.
Fuente: Elaboración propia con fotografías de la estación Agua Santa de la REMA

Descripción del área de estudio

Localización

El municipio de Puebla (Figura 4) es la capital del Estado de Puebla, ubicada en la zona centro Oeste del estado de Puebla en las coordenadas geográficas siguientes: los paralelos 18°50'42" y 19°13'48" latitud Norte, los meridianos 98°00'24" y 98°19'42" latitud Occidental (Protección Civil del Municipio de Puebla, 2010).

Puebla es uno de los municipios con mayor importancia nacionalmente debido a la concentración de la población existente en este municipio, así como la influencia que tiene a nivel económico y social, esto gracias a que posee una gran presencia de actividad industrial y comercial (H. Ayuntamiento de Puebla 2014-2018, 2014). Para el año 2011 el municipio de Puebla comprendía 542.31 Km², sin embargo, causado por el crecimiento desmedido de la población los límites político-administrativos han sido rebasados, haciendo que el municipio de Puebla se una con otros municipios del Estado de Puebla y del Estado de Tlaxcala (H. Ayuntamiento de Puebla 2011-2014, 2011). Mientras que para el año 2014

el municipio tenía una superficie de 544.712 Km², (H. Ayuntamiento de Puebla 2014-2018, 2014).

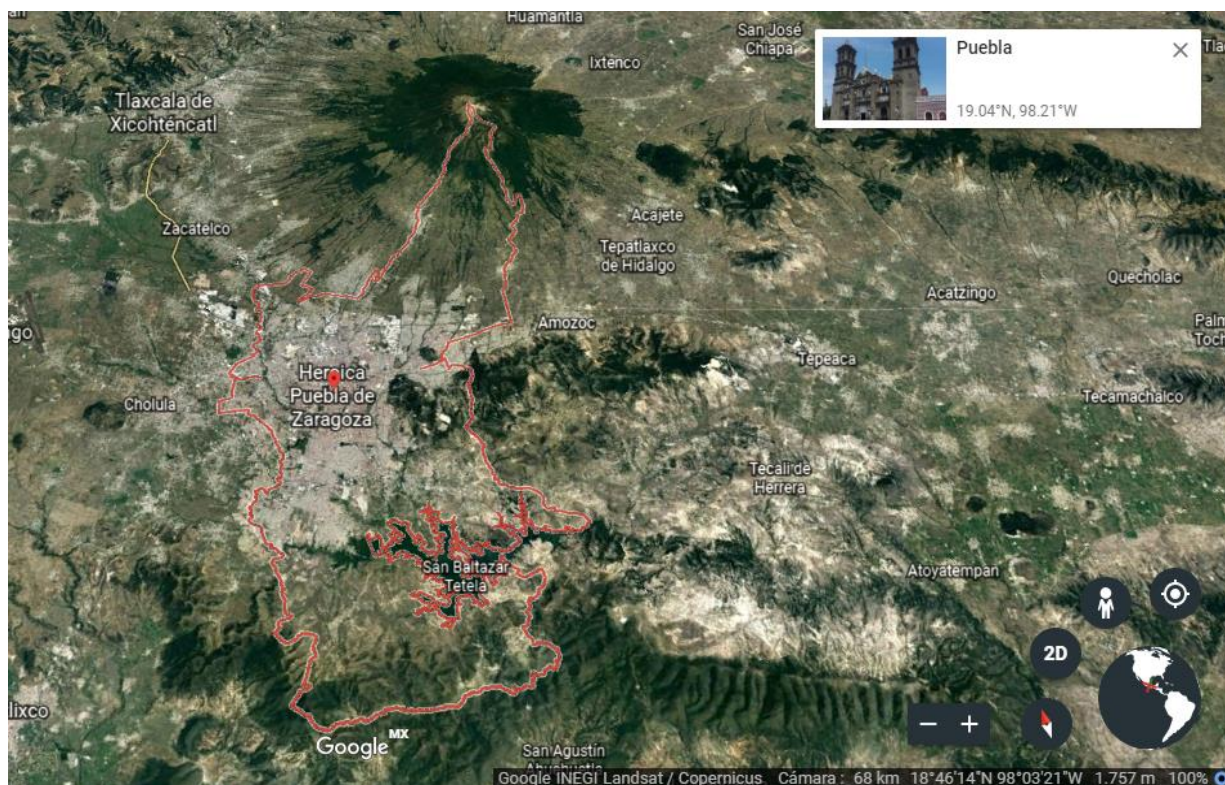


Figura 4 Mapa del Municipio de Puebla.
Fuente: Google Earth Maps

El municipio de Puebla colinda al Norte, con el estado de Tlaxcala y los municipios de Cautlancingo y Tepatlaxco de Hidalgo; al Este, con Amozoc y Cuautinchan; al Sur, con los Municipios de Tzicatlacoyan, Huehuetlán el Grande y Teopantlán; al Oeste, con los municipios de Ocoyucan, San Andrés Cholula y San Pedro Cholula (H. Ayuntamiento de Puebla 2011-2014, 2011).

Finalmente, el municipio de Puebla forma parte de una de las 57 zonas metropolitanas que existen en el país, la cual es la zona metropolitana Puebla- Tlaxcala, es por esto que se encuentra una gran zona urbana desarrollada en este municipio de Puebla.

Aspectos demográficos y económicos

Población

El municipio de Puebla es de las ciudades más pobladas a nivel nacional, en este municipio se encuentra más de la cuarta parte de la población del estado de Puebla y su población se encuentra distribuida en 120 localidades, concentrada en la zona centro como se

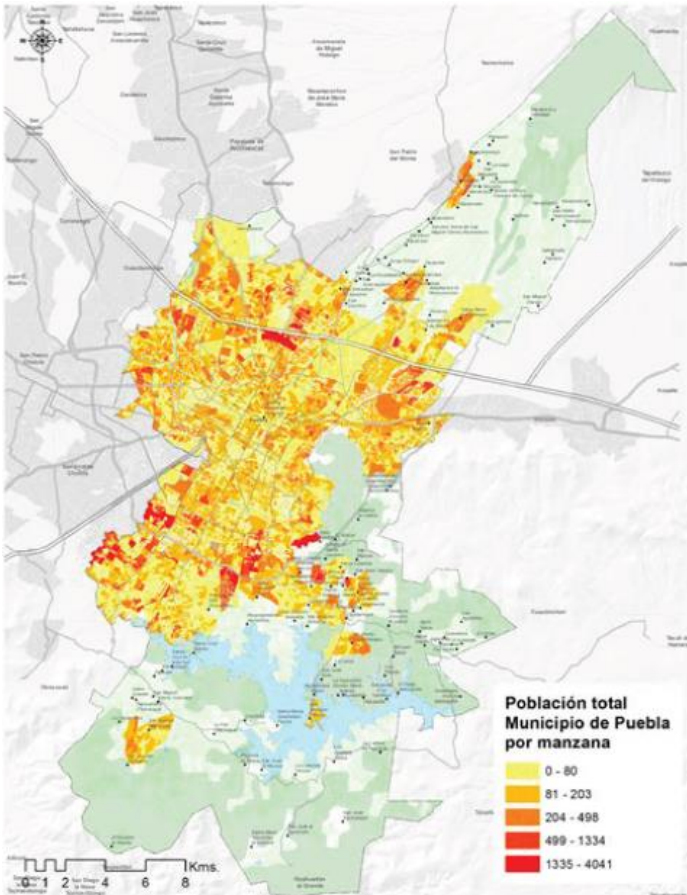


Figura 5 Mapa de la población del Municipio de Puebla por manzana.

Fuente: Plan Municipal de Desarrollo 2014-2018

habitantes con una densidad de población de 2936.84 hab/Ha (H. Ayuntamiento de Puebla 2014-2018, 2014) (Protección Civil del Municipio de Puebla, 2010). Para el año 2000 y 2005 se tuvo un aumento de población 139,023 habitantes, mientras que entre el año 2005 y 2010 incrementó 53,878 habitantes, a pesar de que en estos últimos años la tendencia es menor, esto no indica que la población no mantenga un crecimiento considerable, implicando una mayor demanda de productos y servicios y en la ampliación urbana (Protección Civil del Municipio de Puebla, 2010).

Por otro lado, de acuerdo con una proyección realizada por el Consejo Nacional de Población (CONAPO) se esperaba que para el 2018 se tuviera un aumento de 144,860 habitantes y que para el año 2030 la población en el municipio de Puebla sea de 1,785,639 habitantes, es decir, 256,130 de personas más para este año, este crecimiento de la población se puede observar en la Figura 6. (H. Ayuntamiento de Puebla 2014-2018, 2014).

muestra en el mapa de la Figura 5 (Protección Civil del Municipio de Puebla, 2010), además de que presenta un crecimiento constante en su población desde hace varios años, de acuerdo a los censos de población y vivienda realizados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), donde se establecen que para el año 2000 el municipio contaba con una población de 1,346,916 habitantes con una densidad de 2568.93 hab/Ha, para el año de 2005 se presentó una población de 1,485,945 habitantes con una densidad poblacional de 2834.08 hab/Ha y finalmente en el año 2010 en el municipio de Puebla se tenía una población de 1,534,819



Figura 6 Dinámica Poblacional del Municipio de Puebla 2005-2030
Fuente CONAPO.

Economía

Una de las principales actividades que se practican dentro del municipio de Puebla es la industria, siendo una de las fuentes de emisión a la atmósfera más importante, dentro del municipio, por lo que se abordará con mayor interés en esta investigación que las demás actividades económicas realizadas en el área estudió (H. Ayuntamiento de Puebla 2014-2018, 2014).

Las principales industrias que se encuentran dentro del municipio son la industria metálica básica, la automotriz la química ligera y la de artículos eléctricos; dentro del municipio se encuentran zonas industriales bien establecidas, que son el Parque Industrial 5 de mayo, el Fraccionamiento Industrial Resurrección y el Parque Industrial Puebla 2000 siendo el más cercano al área metropolitana de Puebla (Protección Civil del Municipio de Puebla, 2010).

Aspectos ambientales

Geología y Orografía

El municipio de Puebla se encuentra en el eje neovolcánico correspondiente a la subprovincia de los lagos y volcanes de Anáhuac, además de ser un valle rodeado por las mayores elevaciones del país, que son el pico de Orizaba, el Popocatepetl, la Iztaccíhuatl y la Malinche, este valle cubre desde el Noreste y centro del Municipio de Puebla, este valle se encuentra la mayor parte de la zona urbana del municipio, esto se ve reflejado en que el 28.60 % de usos de suelo son para áreas urbanas, siendo el segundo mayor uso después

de la agricultura con 36.1 % (H. Ayuntamiento de Puebla 2011-2014, 2011) (Protección Civil del Municipio de Puebla, 2010).

Clima

El clima presente en el municipio de Puebla de acuerdo con la verificación de la climatología que se realizó para esta investigación como se observa en el mapa de la Figura 7, se encuentran tres tipos de climas distintos en la zona de estudio, de los cuales el clima semifrío subhúmedo [C(E)(w2)(w)] con lluvias de verano y sequía en invierno, porcentaje de lluvia invernal menor a 5 y que corresponde a los más húmedos de los subhúmedos con un cociente precipitación anual en mm/Temperatura media anual en °C (P/T) mayor a 55, se presenta en el norte del municipio; el clima templado subhúmedo [C(w1)(w)] con lluvias de verano y sequía en invierno, porcentaje de lluvia invernal menor a 5 y corresponde a los intermedios en cuanto a grado de humedad con un cociente (P/T) entre 42.3 y 55; el cual se encuentra en la zona sur del municipio. Mientras que en el centro del Municipio de Puebla se encuentra el clima templado subhúmedo [C(w2)(w)] con lluvias de verano y sequía en invierno, porcentaje de lluvia invernal menor a 5 y corresponde a los más húmedos de los subhúmedos con un cociente P/T mayor a 55.

Precipitación y Temperatura

En el municipio de Puebla se presenta una precipitación que entre los 800 y 1200 mm anualmente de acuerdo con la climatología realizada como se muestra en el mapa de la Figura 8, por otro lado, el periodo de lluvia que se presenta en el municipio ocurre de mayo a octubre con dos máximos uno en junio y el otro en septiembre (Protección Civil del Municipio de Puebla, 2010).

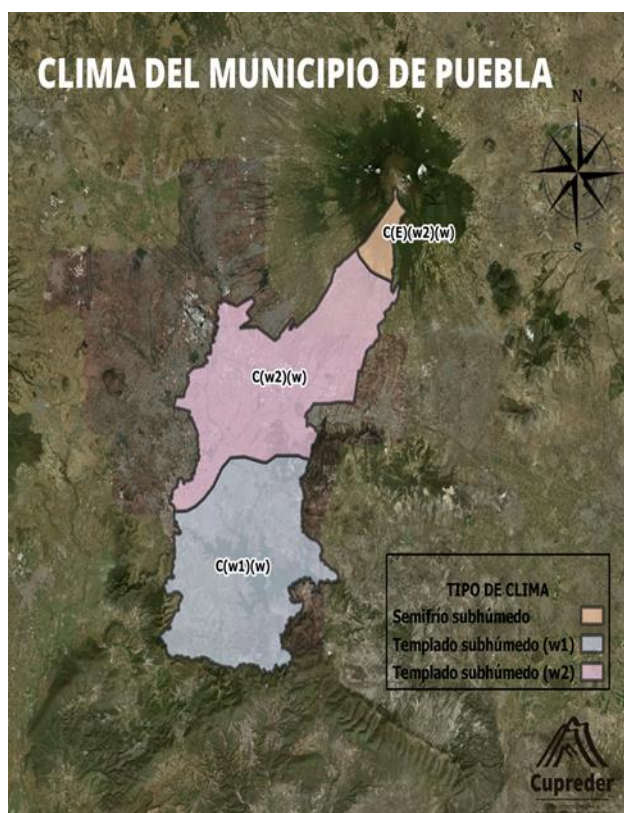


Figura 7 Mapa de climas presentes en el Municipio de Puebla.

Fuente: Elaboración propia en colaboración con CUPREDER

En el caso de la temperatura el municipio presenta siete rangos de temperaturas diferentes, dentro de los cuales predominan el de 14 a 16 °C y el de 16 a 18 °C en toda la zona centro y sur del municipio, encontrándose mayor variedad de temperaturas en la zona norte (Figura 9). Cabe destacar que en el caso de la temperatura los meses más fríos se presentan en el mes de enero y el mes más caliente en el mes de mayo (H. Ayuntamiento de Puebla 2011-2014, 2011).



Figura 9 Mapa de precipitación del Municipio de Puebla.
Fuente: Elaboración propia en colaboración con CUPREDER



Figura 8 Mapa de los rangos de temperatura presentes en el Municipio de Puebla.
Fuente: Elaboración propia en colaboración con CUPREDER

Viento

El municipio presenta un 85 % de corrientes de viento de Nornoroeste (NNE) a Sursuroeste (SSO) a lo largo del año, presentando la mayor velocidad en el mes de enero con 1.6 m/s y menor velocidad en el mes de diciembre con 0.5 m/s (H. Ayuntamiento de Puebla 2011-2014, 2011).

Situación Ambiental

El municipio de Puebla al ser la capital del Estado y formar parte de la zona metropolitana Puebla-Tlaxcala es uno de los lugares con mayor cantidad de problemas ambientales en diversos ámbitos en el Estado de Puebla. Esto no solo se debe a su crecimiento de población y urbanización, sino que también se debe al crecimiento del parque vehicular del

municipio, a la llegada de nuevas industrias y a la falta de implementación de estrategias para el control de la contaminación del agua, suelo y atmósfera.

En el caso de la contaminación atmosférica, se han implementado algunas medidas de control para fuentes fijas, así como para fuentes móviles por medio de la verificación vehicular, se han realizado trabajos de investigación por parte del gobierno para conocer la situación ambiental que se tenía en el rubro de aire en el municipio de Puebla, uno de ellos es el Cuarto almanaque de Datos y Tendencias de la calidad de Aire en 20 ciudades mexicanas, donde se analiza la calidad del Aire del 2000 al 2009 de diversas ciudades dentro de ellas Puebla.

En la investigación antes mencionada se concluyó que el principal problema con la calidad del aire en la ciudad se relaciona con las altas concentraciones de O₃, sin embargo, se destacó que en el año 2009 existió deficiencia de datos para la evolución del O₃ y PM₁₀ (Instituto Nacional de Ecología , 2011).

Otro trabajo de investigación es Programa de Gestión de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla 2006-2011, dónde se evalúa la calidad del aire de la Zona Metropolitana de Puebla donde se hace una recopilación de datos del 2006 al 2011, además de establecer estrategias para el mejoramiento la calidad del aire en el área de estudio y de las condiciones de operación e instalaciones de la REMA, en este proyecto nos menciona que la calidad del aire respecto a partículas de la ciudad ha mejorado y desde 2006 el promedio de estas está dentro de la NOM-025-SSA1-1993, mientras que, respecto al O₃ ha disminuido y se encuentra dentro de la norma así como los contaminantes CO, SO₂ y NO₂ (Dirección de Calidad del Aire, 2012).

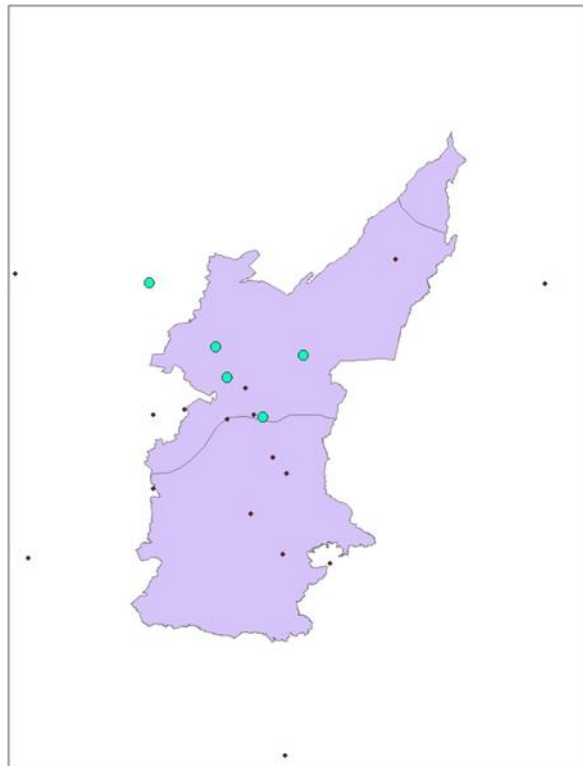
Red de Estatal de Monitoreo Atmosférico

Como consecuencias de diversos factores que afectan la calidad del aire dentro del municipio de Puebla el gobierno del estado implemento el Sistema Estatal de Monitoreo Ambiental de Puebla (SEMA-Puebla), comenzando a operar en el año 2000 con las estaciones Ninfas, Serdán, Agua Santa y Tecnológico, estas miden contaminantes criterios como PM_{10} , O_3 , CO , NO_x , SO_2 y algunos parámetros meteorológicos; en 2003 fue incorporado al SINAICA. Para el 2008 se nombró como Red de Monitoreo Atmosférico Estatal (REMA), además de ampliar su cobertura monitoreando $PM_{2.5}$ y CO_2 (Instituto Nacional de Ecología , 2011).

Hoy en día la REMA se conforma de las siguientes estaciones Agua Santa, la estación Ninfas, la estación BINE, la estación UTP y finalmente a pesar de no encontrarse ubicada en el municipio de Puebla se decidió considerar para esta investigación la estación automática Velódromo, con la finalidad de observar la dispersión de los contaminantes, estas estaciones se pueden observar en la Figura 10, representadas de color verde; la Red de Monitoreo Atmosférico Estatal actualmente es operada por la Secretaría de Desarrollo Rural, Sustentabilidad y Ordenamiento Territorial.

A pesar de que REMA está incorporada en el SINAICA, no todos los datos son transmitidos en tiempo real, lo cual causando algunas deficiencias y

problemas al querer conocer los datos con fines de investigación o simplemente de para valoración de la calidad del aire día con día en la ciudad.



*Figura 10 Mapa de la ubicación de estaciones meteorológicas y estaciones de monitoreo atmosférico pertenecientes a la REMA.
Fuente: Elaboración propia en colaboración con CUPREDER*

Capítulo II. Metodología

El presente trabajo de investigación es de carácter cualitativo, sin embargo, presenta un ligero enfoque cuantitativo. En la parte cualitativa, se muestra la relación que hay del comportamiento de los contaminantes en el aspecto de su química con las variables meteorológicas precipitación, temperatura, velocidad y dirección del viento, además, de la tendencia de la concentración de los contaminantes en municipio de Puebla del 2012 al 2017 y la comparación del cumplimiento de las normas establecidas por la Secretaría de la salud para la concentración de los contaminantes criterio.

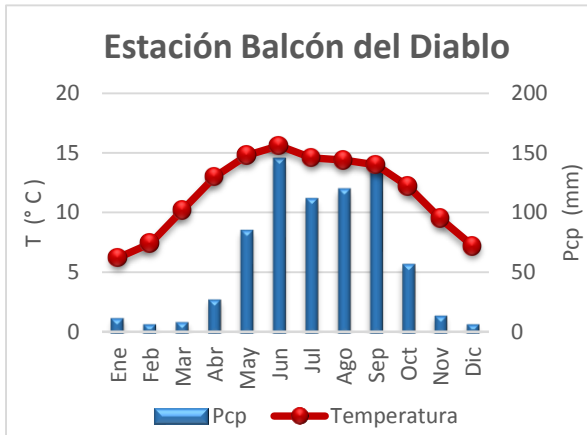
Con respecto a la parte cuantitativa, se ordenaron los datos de la concentración de los contaminantes reportados por las estaciones pertenecientes a la REMA y las concentraciones de las variables meteorológicas reportadas por las estaciones meteorológicas, donde, se realizaron promedios mensuales, promedios anuales, máximos y medias móviles a través de funciones establecidas en Excel.

Climatología

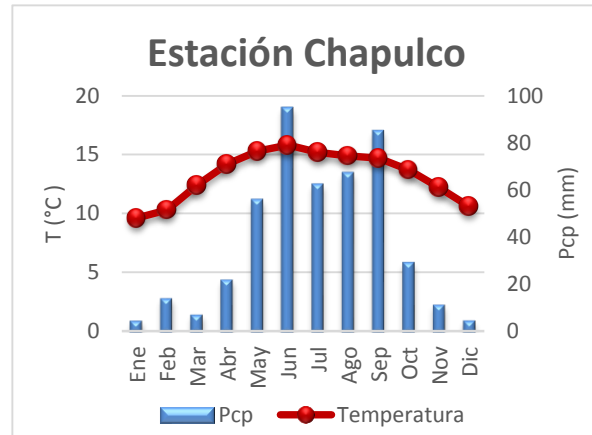
Para la verificación de la climatología de la zona de estudio se llevó a cabo un análisis climatológico, comenzando con la búsqueda estaciones de meteorológicas dentro del municipio de Puebla que son administradas por el Servicio Meteorológico Nacional, la obtención de datos se realizó a través del Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC) versión 3, que facilita la extracción de información del banco de datos histórico nacional del Servicio Meteorológico Nacional, contenido en la base de datos clima computarizado (CLICOM) hasta enero de 2007. Esta base de datos se utilizó con la finalidad de obtener un periodo de datos más grande, ya que la climatología debe ser realizada con por lo menos un periodo de 30 años de datos.

Las estaciones meteorológicas se eligieron conforme a su ubicación, ya que debían encontrarse dentro de la zona de estudio y posteriormente se descartaron de acuerdo con la cantidad de datos que proporcionaban, finalmente, las Estaciones meteorológicas elegidas son Balcón diablo, Chapulco, Echeverría, Puebla (DGE), San Baltazar Tetela, Presa Boqueroncitos, como se muestra en el mapa (Figura 9) de la localización de estas estaciones meteorológicas representadas en color morado. Posteriormente para comenzar con el análisis climatológico los datos obtenidos del programa ERIC se realizaron climogramas de cada estación meteorológica seleccionada, es decir, gráficos que representan simultáneamente el comportamiento anual de la precipitación y temperatura

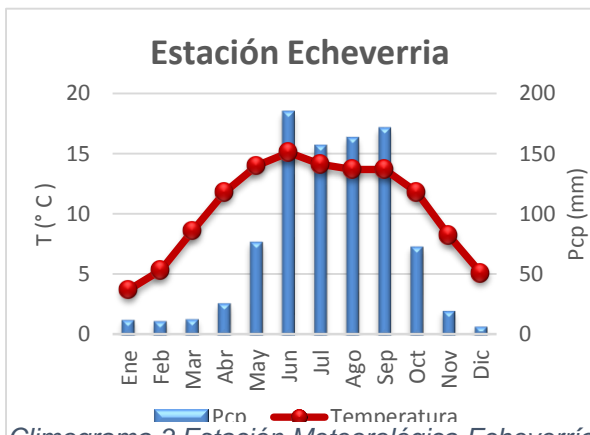
del lugar donde se encuentra ubicada cada estación meteorológica que se observan a continuación.



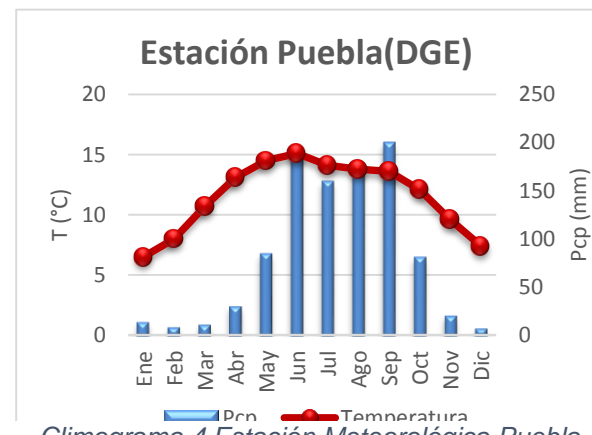
Climograma 1 Estación Meteorológica Balcón del Diablo
Fuente: Elaboración propia



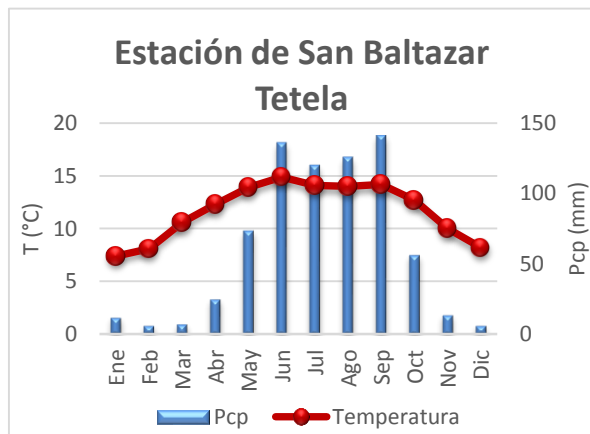
Climograma 2 Estación Meteorológica Chapulco
Fuente: Elaboración propia



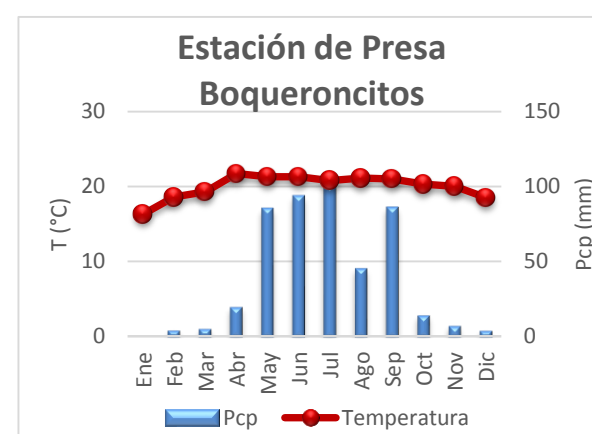
Climograma 3 Estación Meteorológica Echeverría
Fuente: Elaboración propia



Climograma 4 Estación Meteorológica Puebla
Fuente: Elaboración propia



Climograma 5 Estación Meteorológica San Baltazar Tetela
Fuente: Elaboración propia



Climograma 6 Estación Meteorológica Presa Boqueroncitos
Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenidos estos climogramas, se llevó a cabo el análisis climatológico de cada estación, comenzando con la determinación del clima de la zona de acuerdo con la clasificación climática de Köppen con la modificación de Enriqueta García. Con la clasificación realizada se elaboró un mapa climatológico del municipio de Puebla (Figura 7), de igual forma con base en el análisis climatológico se realizó un mapa para la precipitación (Figura 8) y los rangos de temperatura (Figura 9) de la zona de estudio.

Clasificación de datos de contaminantes

Los datos de las concentraciones de los contaminantes criterio en el periodo 2012-2017 fueron clasificados de acuerdo al siguiente Diagrama 1.

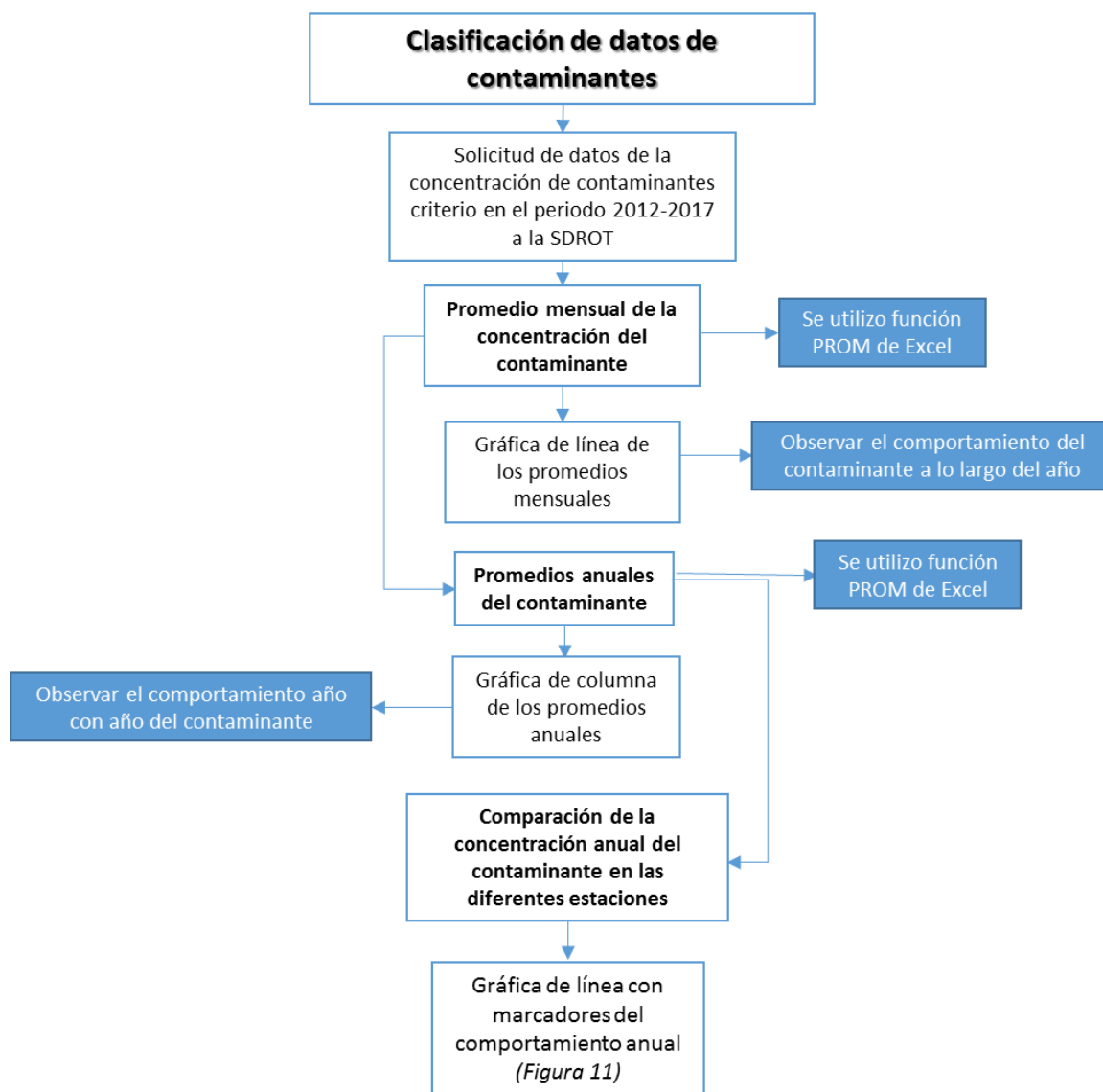


Diagrama 1 Clasificación de datos de contaminantes
Fuente: Elaboración propia

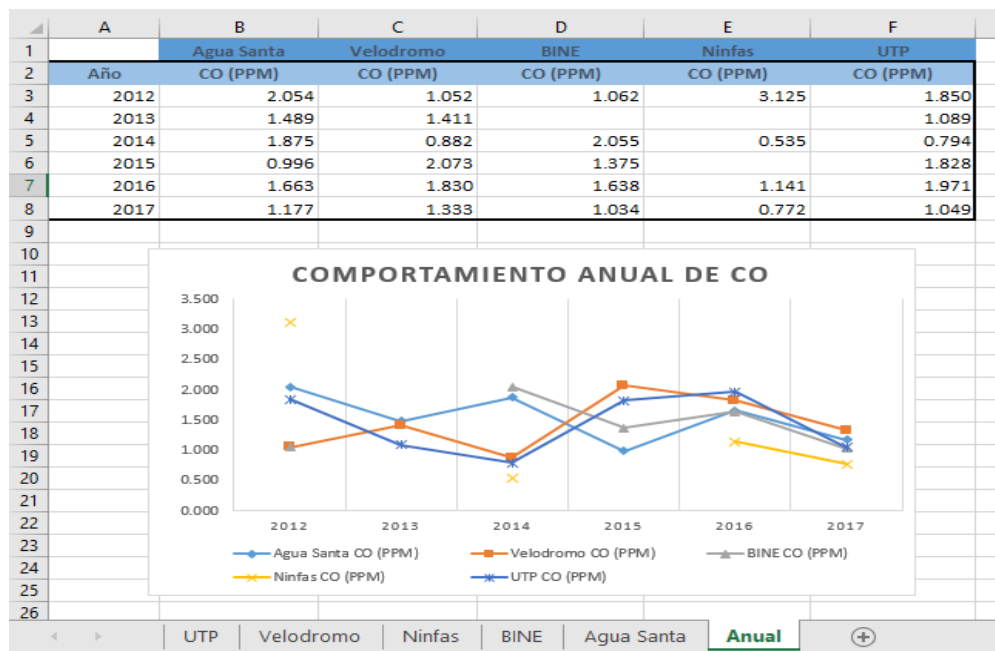


Figura 11 Elaboración de tabla y gráfica del comportamiento anual de los contaminantes criterio
Fuente: Elaboración propia con datos pertenecientes de la REMA

Al realizar el procedimiento del diagrama anterior se utilizaron tres cifras para los decimales en los promedios mensuales de los contaminantes O₃, NO₂, CO, SO₂ mientras que para las partículas PM₁₀ y PM_{2.5} no se utilizaron decimales, esto debido a que de acuerdo con la NOM-025-SSA1-2014 no se requieren decimales para el reporte del cumplimiento de la norma en el caso de estos contaminantes. Sin embargo, para el caso de los demás contaminantes no se establecen estándares de cifras decimales a excepción del ozono donde en la NOM-020-SSA1-2014 establece que se deben reportar las concentraciones con tres cifras decimales, es por esto que se decidió estandarizar y utilizar tres cifras decimales para los demás contaminantes criterio. Además, este procedimiento fue repetido para cada contaminante criterio reportado por cada una de las estaciones de monitoreo atmosférico a lo largo del periodo de estudio.

Clasificación de datos meteorológicos

Los datos de las variables meteorológicas, temperatura, precipitación, velocidad y dirección del viento se clasificaron siguiendo el procedimiento descrito en el Diagrama 2 que se muestra a continuación.

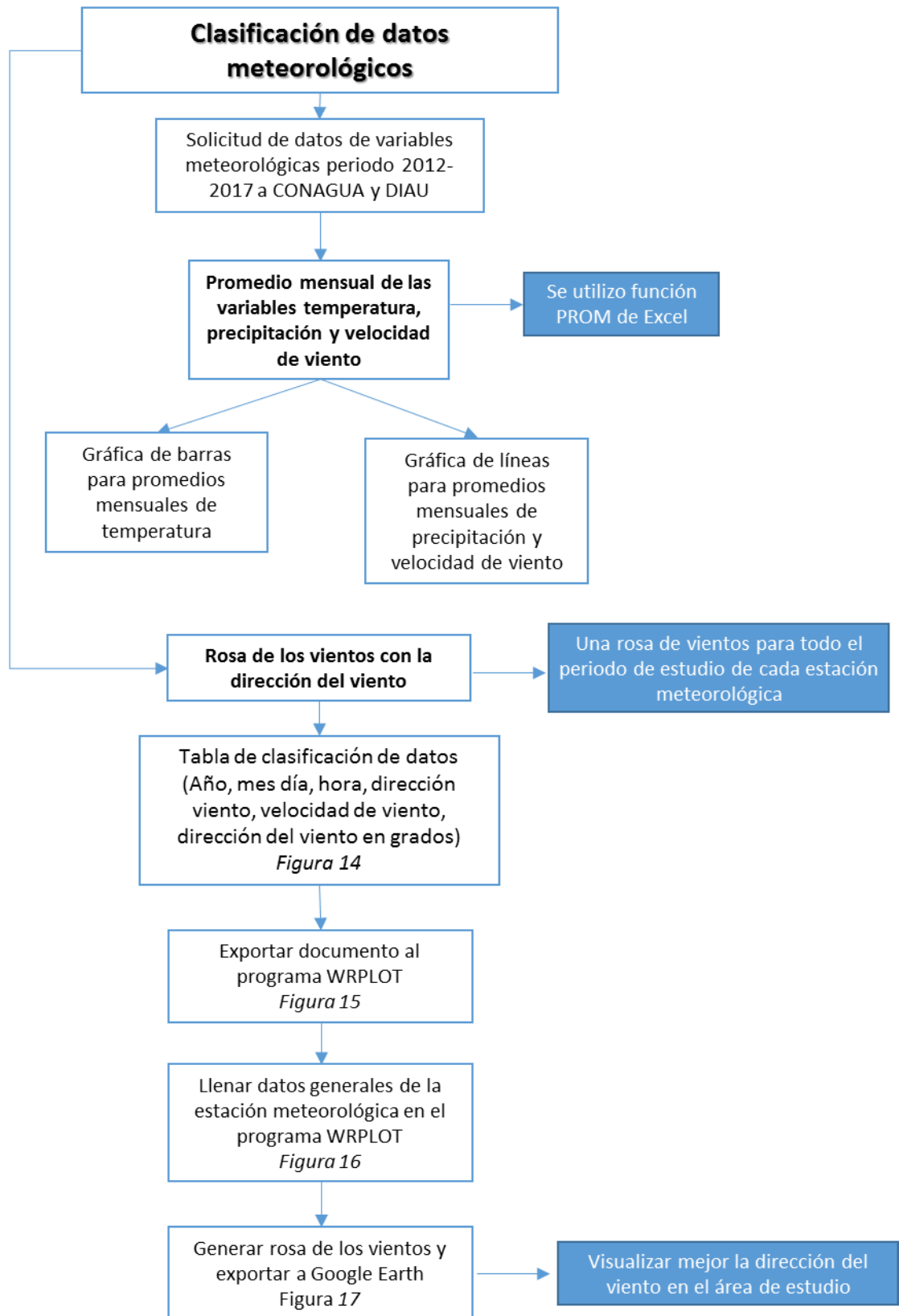


Diagrama 2 Clasificación de datos meteorológicos
Fuente :Elaboración propia

Para el caso de los datos provenientes de las estaciones Echeverría, Mayorazgo y Observatorio pertenecientes a la CONAGUA, estos fueron proporcionados en diversos archivos de Excel por año, donde se puede observar los datos generales de la estación meteorológica, además de los datos diarios de temperatura, visibilidad, tormentas precipitación, dirección y velocidad de viento, como se muestra en la Figura 12.

COMISION NACIONAL DEL AGUA COORDINACIÓN GENERAL DEL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL SUBGERENCIA DE INFORMÁTICA Y TELECOMUNICACIONES OBSERVACIONES CLIMATOLÓGICAS HECHAS A LAS 8 HORAS.																																																																																			
LATITUD :		19°57'58		LONGITUD :		98°16'32		ALTITUD :		2,070.0 msnm		MES : ENERO		AÑO : 2012																																																																					
MUNICIPIO :				PUEBLA				ESTADO :				PUEBLA				NOMBRE ESTACIÓN :				ECHEVERRIA				CLAVE CLICOM :				21034																																																							
GERENCIA REGIONAL :								BALSAS								REGIÓN HIDROLÓGICA :								18								CUENCA :								ATOYAC																																											
TERMOMETRO AL ABRIGO														LLUVIA EN MICRÓMETRO														EVAP. 24														ESTADO DEL TIEMPO A LA HORA DE LA OBSERVACION														ESTADO DEL TIEMPO EN LAS 24 HS.														RESUMEN MENSUAL													
AMBIENTE				MAXIMA				MINIMA				FLUJOMETRO				LECTURA				LECTURA				MRS. EN				HELADA				DIRECC				VELOC				VISIB.				CIELO				FENOMENOS VARIOS				TORRENTA				GRANIZO				NIEBLA				NEVE				EDO.															
1				14.0				5.5				49.12				5.39				0				S				2				T-10				1																																															
2				13.0				24.0				4.5				0.0				43.73				4.76				0				N				2				T-10				0																																							
3				10.5				18.5				6.0				0.0				38.97				4.09				0				N				2				T-10				0																																							
4				7.0				13.0				2.5				0.0				34.88				3.84				0				N				2				T-10				0																																							
5				7.5				20.0				3.0				0.0				31.04				4.78				0				N				2				T-10				0																																							
6				7.5				20.5				2.5				0.0				26.26				4.05				0				N				2				T-10				0																																							
7				8.0				20.0				2.5				0.0				22.21				2.55				0				W				1				T-10				0																																							

Figura 12 Datos de variables meteorológicas provenientes de estaciones de CONAGUA
Fuente: CONAGUA

Por otro lado, los datos de las variables meteorológicas reportados por las estaciones Canoa, DIAU centro, San Manuel, UPN y Azumiatlá pertenecientes al DIAU, se proporcionaron en un archivo de Excel para cada estación, donde podían consultarse datos horarios de temperatura, velocidad de viento, dirección de viento, ráfagas y precipitación (Figura 13).

Date	Time	Temp Out	Wind Speed	Wind Dir	Hi Speed	Hi Dir	Rain
01/01/2012	12:15 a. m.	10.7	0	N	1.8	N	0
01/01/2012	01:00 a. m.	10.2	1.8	N	3.1	N	0
01/01/2012	02:00 a. m.	8.7	0.4	NNW	2.2	NNW	0
01/01/2012	03:00 a. m.	8.7	1.3	NNW	2.7	NNW	0
01/01/2012	04:00 a. m.	8.3	2.7	NNW	3.6	NNW	0
01/01/2012	05:00 a. m.	7.7	0.4	N	1.8	N	0
01/01/2012	06:00 a. m.	7	0	N	1.8	N	0
01/01/2012	07:00 a. m.	7.2	0.9	NE	1.8	NE	0
01/01/2012	08:00 a. m.	8	1.3	ENE	2.2	ENE	0
01/01/2012	09:00 a. m.	10.4	0.9	ENE	1.8	ENE	0
01/01/2012	10:00 a. m.	13.8	1.8	ENE	3.6	ESE	0
01/01/2012	11:00 a. m.	16.5	3.1	NE	5.4	NE	0
01/01/2012	12:00 p. m.	18.2	4	SE	6.7	SE	0
01/01/2012	01:00 p. m.	19.4	4.5	ESE	7.2	ESE	0
01/01/2012	02:00 p. m.	20.1	3.6	SSE	6.7	SE	0
01/01/2012	03:00 p. m.	20.5	5.4	SSE	9.4	SE	0
01/01/2012	04:00 p. m.	19.9	6.7	ESE	10.3	SE	0
01/01/2012	05:00 p. m.	18.3	7.2	ESE	10.3	SE	0

Figura 13 Datos de variables meteorológicas provenientes de estaciones de DIAU
Fuente: Elaboración propia

Para la realización de la rosa de los vientos se utilizó el programa WRPLOT View versión 8.0.2.

	A	B	C	D	E	F	G
1	Año	Mes	Día	Hora	Dir. Viento	Vel. Viento	Dir. Viento (grados)
2	2012	1	1	1	S	2	180
3	2012	1	2	2	N	2	360
4	2012	1	3	3	N	2	360
5	2012	1	4	4	N	2	360
6	2012	1	5	5	N	2	360
7	2012	1	6	6	N	2	360
8	2012	1	7	7	W	1	270
9	2012	1	8	8	CALMA	0	---
10	2012	1	9	9	CALMA	0	---
11	2012	1	10	10	CALMA	0	---
12	2012	1	11	11	CALMA	0	---
13	2012	1	12	12	CALMA	0	---
14	2012	1	13	13	CALMA	0	---
15	2012	1	14	14	CALMA	0	---
16	2012	1	15	15	CALMA	0	---
17	2012	1	16	16	CALMA	0	---

Figura 14 Tabla para la elaboración de la Rosa de los Vientos
Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA y DIAU

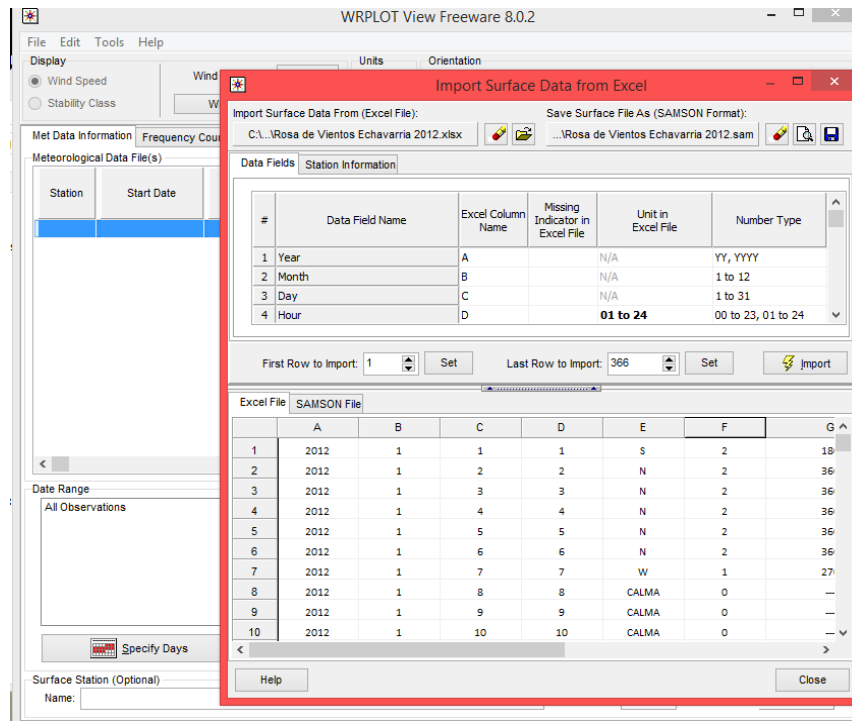


Figura 15 Exportación de tabla de elaboración de rosa de vientos al programa WRPLOT View
Fuente: Elaboración propia con datos de DIAU Y CONAGUA

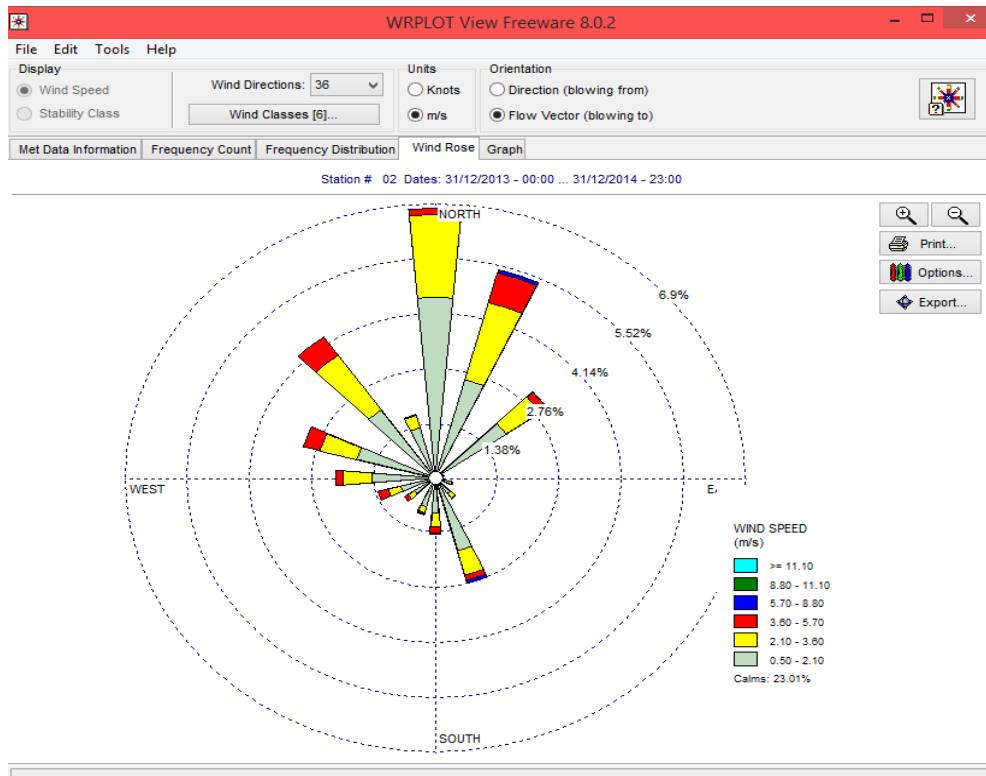


Figura 16 Rosa de los vientos elaborada en el programa WRPLOT View
Fuente: Elaboración propia con datos proporcionados por CONAGUA y DIAU



Figura 17 Rosa de los vientos exportada en Google Earth
Fuente: Elaboración propia

Este procedimiento para la obtención de promedios mensuales de la precipitación, la temperatura y la velocidad de viento, se realizaron para cada estación meteorológica, en cada año del 2012 al 2017, debido a que estos datos meteorológicos serán con los que se comparen el comportamiento de los contaminantes criterio

Gráficas de comparación de datos meteorológicos y contaminantes

En el caso de la elaboración de gráficas para el análisis del comportamiento de los contaminantes criterio frente a las variables meteorológicas de temperatura, precipitación, velocidad de viento, se siguió el procedimiento establecido en el Diagrama 3.

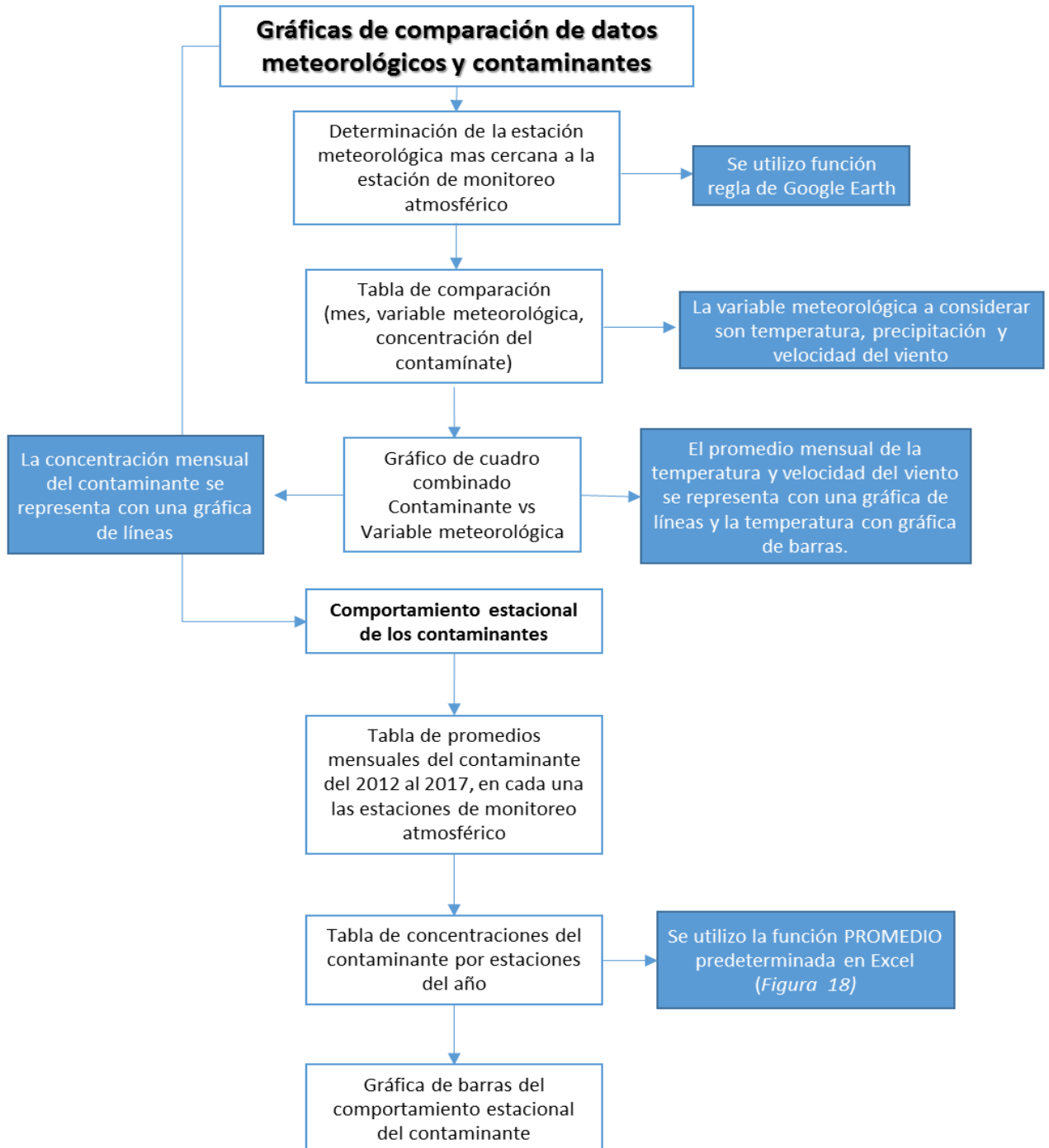


Diagrama 3 Gráficas de comparación de datos meteorológicos y contaminantes
Fuente: Elaboración propia

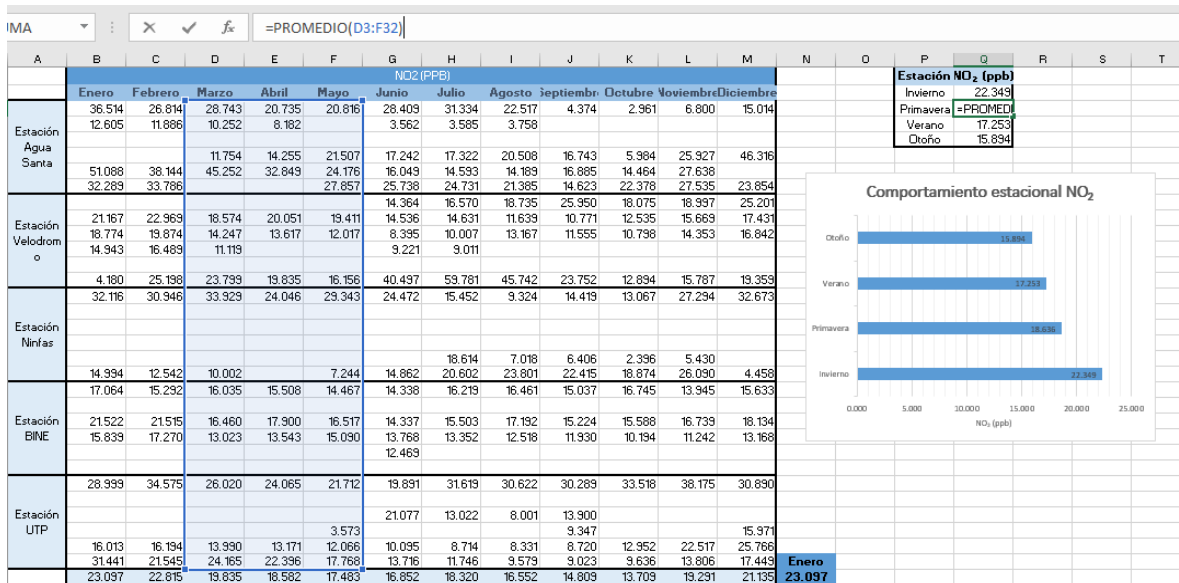


Figura 18 Tabla y gráfica del comportamiento estacional de los contaminantes
Fuente: Elaboración propia con datos de la REMA

Este procedimiento se repitió para cada contaminante en cada estación de monitoreo atmosférica durante el periodo de análisis 2012-2017.

Clasificación de datos para comparación con la norma

Para la comparación de las concentraciones de los contaminantes con respecto de los límites permisibles establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas correspondientes de la Secretaría de Salud, se llevaron a cabo algunos promedios diferentes a los realizados anteriormente, debido a que algunas normas piden promedios de cada ocho horas o promedios realizados con fórmulas especiales como es el caso de las partículas, para desarrollar esta clasificación se siguió el siguiente Diagrama 4.

Para el caso de los promedios de ocho horas se verificó en la normatividad de la Secretaría de Salud de acuerdo con la Tabla 1, cuáles contaminantes tienen promedio móvil de ocho horas, es decir, el ozono, el dióxido de azufre y el monóxido de carbono, con la finalidad de comparar con los límites máximos permisibles establecidos en las normas y conocer si cumplen con la normatividad.

Este procedimiento se repitió para cada año del periodo de interés, en cada estación y solo en los contaminantes que requerían promedios móviles de ocho horas.

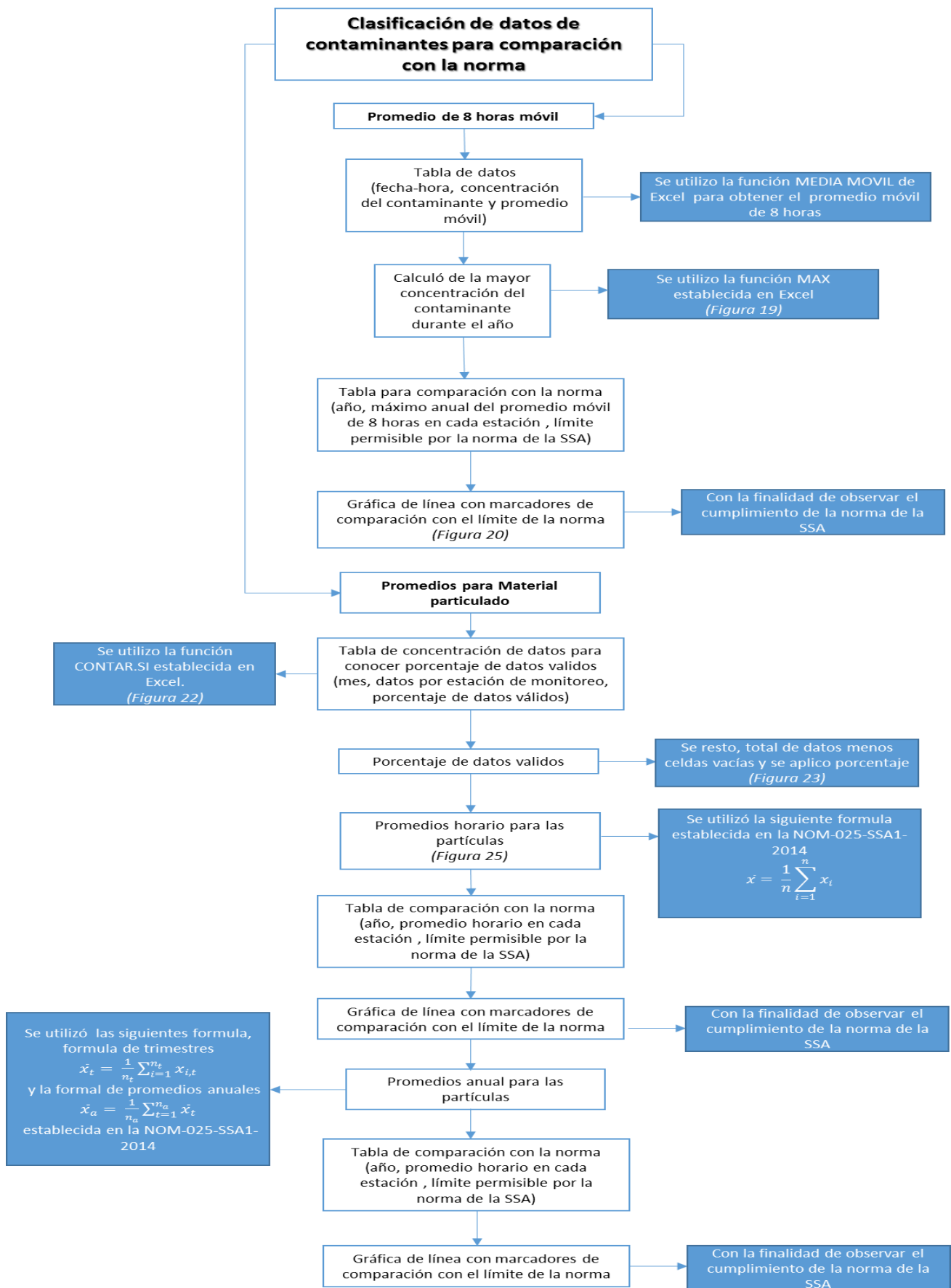


Diagrama 4 Clasificación de datos de contaminantes para comparación con la norma
Fuente: Elaboración propia

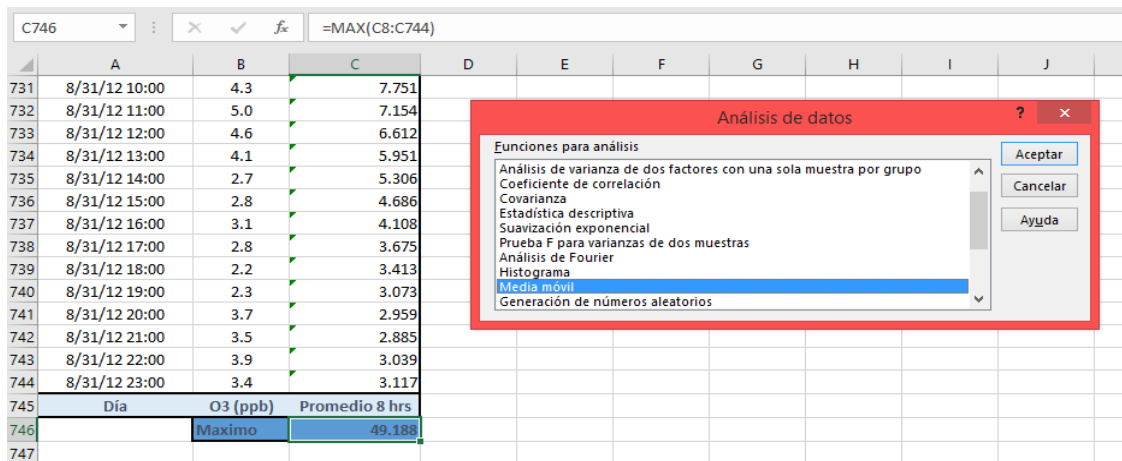


Figura 19 Determinación del promedio móvil de ocho horas y el máximo anual
Fuente: Elaboración Propia con datos provenientes de la REMA

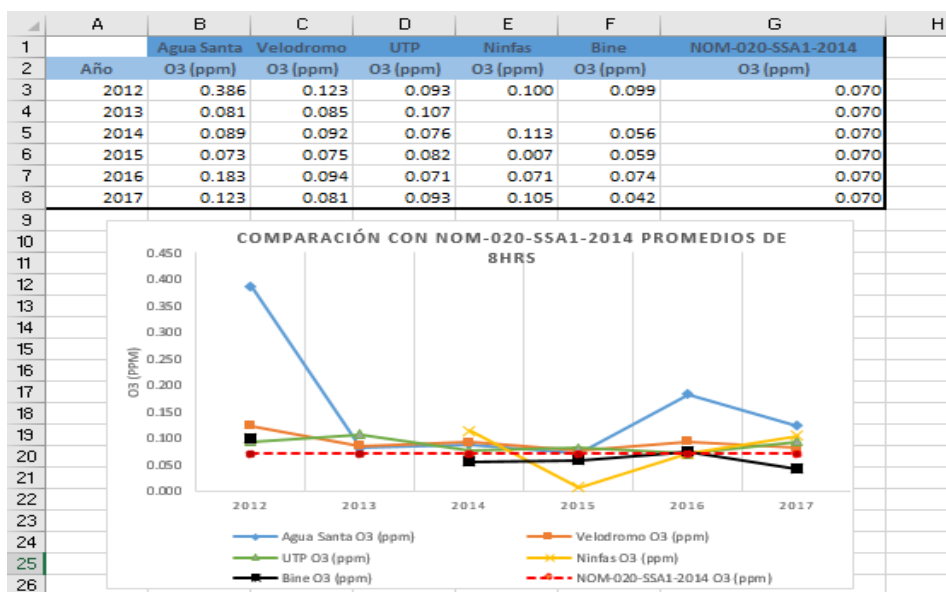


Figura 20 Tabla y gráfica de comparación con los límites de la norma
Fuente: Elaboración propia con datos provenientes de la REMA

En el caso del dióxido de azufre se obtuvo las dos concentraciones máximas a lo largo del año, se realizó este procedimiento para cada año en cada estación de monitoreo atmosférico, para la determinación del primer máximo se utilizó la fórmula MAX predeterminada en Excel y segundo máximo de concentración de dióxido de azufre se determinó por medio de la función K.ESIMO.MAYOR predeterminado en Excel, finalmente se realizó una comparación con la norma, donde, en un archivo de Excel se colocó una tabla con el primer máximo y el segundo máximo de cada estación en ese año y el límite máximo permisible establecido por la norma como se muestra en la Figura 21.

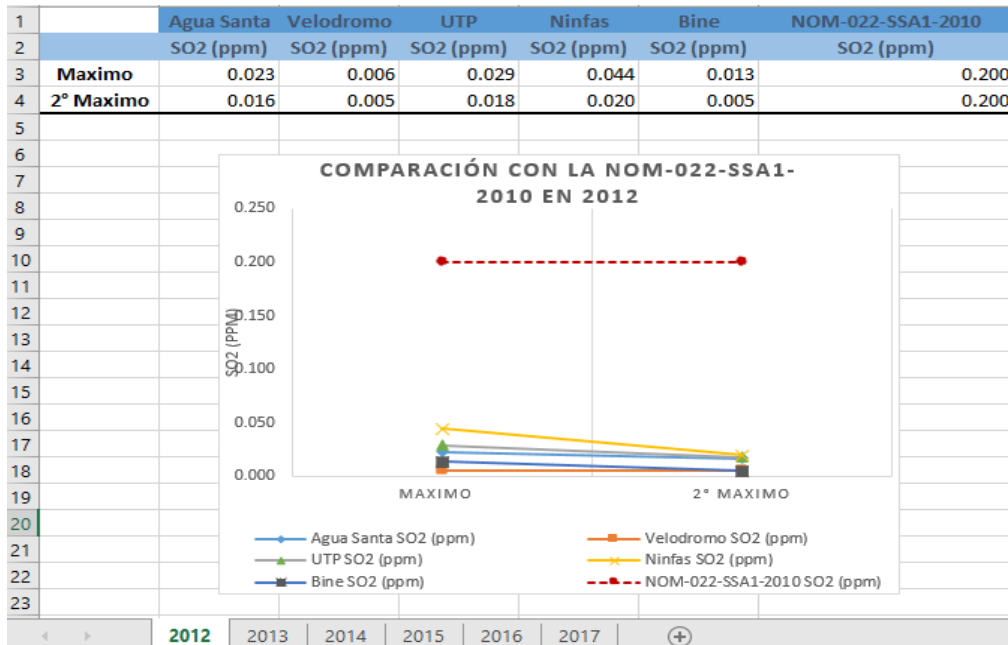


Figura 21 Determinación de la segunda mayor concentración del SO₂
Fuente: Elaboración propia con datos provenientes de la REMA

Para el caso de las partículas con diámetro aerodinámico igual o menor a 10 micrómetros (PM₁₀) y menor o igual 2.5 micrómetros (PM_{2.5}), se realizaron promedios horarios y anuales como lo establece NOM-025-SSA1-2014, con la finalidad de conocer si las concentraciones de estas partículas cumplen o no los límites establecidos en dicha norma, como establece esta norma no se utilizó decimales para los promedios.

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	
1	UTP		NINFAS		BINE		AGUA SANTA		VELODROMO				
2	Microgramo / m3												
3	PM2.5												
8781	11.2		101.8		7.8		15.1		9.1				
8782	9.8		24.4		11.9		34.8		15.4				
8783	19.7		17.8		29.5		41.4		19.8				
8784	26.4		18.6		32.8		49.3		28.6				
8785	33.2	100%	24.8	100%	13.2	99%	79.3	98%	33.4	59%			
8786	58.7	2204	24.5	2199	6.0	2194	90.7	2156	40.6	1310			
8787	57.2	4	14.9	9	15.3	14	88	52	157	898		Celdas totales	
8788	=CONTAR.SI(B4:B8787,"")		110		160		111		7474		Celdas vacías		8784
8789	8751		8674		8624		8673		1310		Celdas llenas		
8790	100%		99%		98%		99%		15%				
8791													

Figura 22 Obtención de celdas vacías
Fuente: Elaboración propia de datos provenientes de la REMA

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1		UTP		NINFAS		BINE		AGUA SANTA		VELODROMO		
2		Microgramo / m3										
3		PM2.5										
2173		28.2		19.7		20.4		84.3				
2174		22.8		16.7		23.5		64.1				
2175		24.0		13.2		16.0		83.4				
2176		25.8		11.8		12.7		84.0				
2177		22.8		4.8		10.6		55.7				
2178		9.0		14.9		11.5		50.6				
2179		9.6		9.0		7.2		34.9				
2180		20.4		7.2		16.1		38.7				
2181		7.8		10.4		17.0		33.1				
2182		14.4		8.5		0.3		35.2				
2183		3.6		6.1		15.0		45.0				
2184		15.0		23.0		14.2		18.6				
2185		10.2	100%	32.9	100%	24.8	99%	18.8	100%		0%	Porcentaje datos
2186		19.2	2183	3.7	2177	19.1	2159	26.4	2178		0	Celdas llenas
2187		=CONTAR.SI(B4:B2187, "")		1.0	7	22.1	25	14.0	6		2184	Celdas vacias
2188	Abril	2.4		9.7		23.3		28.3				
2189		7.2		11.5		16.4		12.4				
2190		13.8		5.3		9.7		19.0				

Figura 24 Fórmula para la obtención de datos validos
Fuente: Elaboración propia de datos provenientes de la REMA

Por otro lado, para el caso del porcentaje de datos trimestral que requiere los promedios anuales, se realizó un proceso similar al descrito anteriormente, de igual forma se utilizó la función de CONTAR.SI, solo cambio el rango, debido a que en este caso el rango es cada tres meses como se puede observar en la Figura 24, mientras que el número de celdas válidas y el porcentaje de datos, se calcularon de igual forma que en el caso anterior.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1		UTP		NINFAS		BINE		AGUA SANTA		VELODROMO				
2		Microgramo / m3												
3		PM2.5												
8781		11.2		101.8		7.8		15.1		9.1				
8782		9.8		24.4		11.9		34.8		15.4				
8783		19.7		17.8		29.5		41.4		19.8				
8784		26.4		18.6		32.8		49.3		28.6				
8785		33.2	100%	24.8	100%	13.2	99%	79.3	98%	33.4	59%			
8786		58.7	2204	24.5	2199	6.0	2194	90.7	2156	40.6	1310			
8787		57.2	4	14.9	9	15.3	14	88	52	157	898			Celdas totales
8788		33		110		160		111		7474				Celdas vacias
8789		=SUMA(\$B788:B8788)		8674		8624		8673		1310				Celdas llenas
8790		88788		99%		98%		99%		15%				
8791														

Figura 23 Obtención de porcentajes de datos validos trimestralmente para partículas
Fuente: Elaboración propia con datos de la REMA

Una vez obtenidos los porcentajes cantidades de datos de partículas en cada estación y en cada año del periodo analizado para las PM_{2.5} y PM₁₀, se continuo por obtener los promedios horarios donde de acuerdo con la NOM-025-SSA1-2014 este promedio debe ser calculado por medio de la siguiente fórmula:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Donde:

\bar{x} = promedio de 24 horas

n = número de concentraciones horarias válidas

x_i = concentraciones horarias válidas

Año	PM2.5 (µg/m3)
2012	8787
2013	23
2014	19
2015	15
2016	16
2017	15

Figura 25 Elaboración de promedios horarios de la concentración de partículas
Fuente: Elaboración promedio con datos provenientes de la REMA

Por otro lado, para los promedios anuales de igual forma que en los promedios horario se siguieron fórmulas establecidas en la NOM-025-SSA1-2014, primero se obtuvieron promedios trimestrales, donde de acuerdo con dicha norma solo se tomaron en cuenta los trimestres que cumplieran con un 75 % de datos válidos, para realizar estos promedios se utilizó la siguiente fórmula:

$$\bar{x}_t = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} x_{i,t}$$

Donde:

t = trimestre del año calendario ($t = 1, 2, 3, 4$)

\bar{x}_t = promedio para el trimestre t

n_t = número de datos válidos en trimestre t

$x_{i,t}$ = valor de concentración correspondientes al día i del trimestre t

Estos promedios trimestrales se calcularon de acuerdo con la fórmula anterior en de Excel, conjuntamente en esta tabla se realizó el promedio anual, el cual se calculó con la siguiente fórmula que establece la NOM-025-SSA1-2014:

$$\bar{x}_a = \frac{1}{n_a} \sum_{t=1}^{n_a} \bar{x}_t$$

Donde:

\bar{x}_a = promedio anual

n_a = número de trimestres válidos en el año

Estos promedios anuales se calcularon para cada estación, en cada año del periodo analizado, tanto para las PM₁₀ como para las PM_{2.5}.

Descripción de ubicación de estaciones de monitoreo atmosférico

Estación Agua Santa

La estación de monitoreo Atmosférico Agua Santa (Figura 26) se encuentra en las coordenadas 18° 59' 24" N, 98° 15' 00" O, se encuentra ubicada dentro de un terreno baldío, alejado de vías de tránsito principales, por lo que se puede determinar que las mediciones de esta estación estarán poco influenciadas por emisiones de automóviles, sin embargo, al estar cerca de un campo abierto se pueden ver afectadas las mediciones de material particulado, debido a que se tiene una mayor probabilidad de encontrar una alta concentración de partículas que en zonas pavimentadas o construidas.

Por otro lado, esta estación se puede observar en buenas condiciones para el monitoreo de contaminantes criterio, cuenta con una estación meteorológica, la cual nos informa el ingeniero a cargo que se encuentra en óptimas condiciones.

Estación Ninfas

La estación Ninfas (Figura 26) se encuentra ubicado en las coordenadas 19° 2' 28" N, 98° 12' 51" O, esta estación está establecida dentro del parque las Ninfas, cercana a las calles 25 Poniente y 17 Sur, que son muy transitadas, lo que puede repercutir en algunas mediciones establecidas de los contaminantes criterio, por otro lado, cerca de esta estación no se encuentran industrias que puedan ser fuentes fijas de contaminantes atmosféricos.

Esta estación de monitoreo atmosférico se observa en óptimas condiciones, cuenta con el equipo necesario de medición de contaminantes, además de una estación meteorológica automática. Sin embargo, sus mediciones de esta última se pueden ver afectadas por la cantidad de árboles grandes que se encuentran a su alrededor.

Estación BINE

La estación de monitoreo atmosférico BINE (Figura 26) se encuentra ubicada en las coordenadas 19° 4' 2" N, 98° 13' 28" O, dentro de las instalaciones del Benemérito Instituto Normal del Estado, cabe resaltar que cerca de la estación se encuentra el Boulevard Hermanos Serdán que es uno de los más transitados en el Municipio de Puebla, lo que puede afectar la concentración de contaminantes criterio como el dióxido de azufre, además alrededor de esta estación de monitoreo se encuentran principalmente comercios y casa-habitación.

Esta estación se puede observar en condiciones óptimas para el monitoreo de contaminantes criterio, al igual que la estación anterior cuenta con una estación meteorológica, la cual puede tener errores en sus mediciones debido a que se encuentra en frente de un edificio de gran altura.

Estación UTP

La estación UTP se encuentra ubicado en las coordenadas 19° 4' 12" N, 98° 09' 00" O, está establecida dentro de la Universidad Tecnológica de Puebla, cerca de ella encuentran las calles Antiguo Camino de la Resurrección y Mario Escobedo, que son calles muy transitadas, repercutiendo esto, en algunas mediciones establecidas de los contaminantes criterio, por otro lado, cerca de esta estación se encuentran industrias que puedan ser fuentes fijas de contaminantes atmosféricos.

Esta estación de monitoreo atmosférico se observa en óptimas condiciones, cuenta con el equipo necesario de medición de contaminantes, además de una estación meteorológica automática.

Estación Velódromo

La estación de Monitoreo Atmosférica Velódromo (Figura 26) a diferencia de las estaciones anteriores no se encuentra ubicada en el área de estudio de este trabajo de investigación, sino en el municipio de Coronango, Sin embargo, decidió considerarse para observar el comportamiento de los contaminantes en sitios aledaños a la zona de estudio. Esta estación se encuentra ubicada en las coordenadas 19°6'56" N, 98° 16'39" O, se encuentra instalada

dentro en el estacionamiento del Velódromo, por lo que las emisiones de los automóviles podrían afectar la concentración de ciertos contaminantes, de igual forma se encuentra el anillo periférico está muy próximo a la estación por lo que esto también podría repercutir en las mediciones; cerca de esta estación se encuentran industrias que pueden contribuir como fuentes fijas para la emisión de ciertos contaminantes criterio.

Por otro lado, esta estación de monitoreo a diferencia de las anteriores se observa un poco más deteriorada, además de tener una estación meteorológica, qué puede ser afectada por un gran edificio que se encuentra en frente de esta.



Figura 26 Estaciones de monitoreo atmosférico pertenecientes a la REMA
Fuente: Elaboración propia con fotografías propias

Capítulo III. Resultados y Discusión

Comportamiento de contaminantes criterio frente a variables meteorológicas

Para conocer el comportamiento de los contaminantes criterio frente a las variables meteorológicas, se analizó las concentraciones de los contaminantes reportados por cada estación de monitoreo atmosférico y se compararon con los datos reportados por la estación meteorológica más cercana para el periodo 2012-2017.

La estación meteorológica más cercana a la estación atmosférica se seleccionó midiendo a través de Google Earth las distancias entre estas, siendo elegida la estación meteorológica a menor distancia como se muestra en la Tabla 5.

Esto con la finalidad de tener una relación más certera entre los contaminantes criterio y las variables meteorológicas, debido que cuanto más cerca se encuentre la estación meteorológica de la estación atmosférica, las variables meteorológicas que se reportan por estas influirán en el comportamiento de los contaminantes criterio de ese lugar.

Para ello, se realizaron cinco comparaciones distintas de estación atmosférica vs. estación meteorológica, considerando todos los contaminantes criterio, las cuales para fines prácticos se nombraron con una letra de la A-E. Además, no todos los años de las cinco comparaciones se consideraron, debido a que no contaban con los datos suficientes para realizar una conclusión certera del comportamiento de la concentración de los contaminantes criterio frente a las diferentes variables meteorológicas.

Tabla 5 Comparaciones entre estaciones de monitoreo atmosférico y estación meteorológica según su distancia

Fuente :Elaboración propia

Comparación	Estación de monitoreo atmosférico	Estación meteorológica	Distancia entre ellas
A	Ninfas	DIAU	1.49 Km
B	Bine	DIAU	3.05 Km
C	Agua Santa	UPN	1.53 Km
D	UTP	OBS	2.19 Km
E	Velódromo	Echeverria	2.62 Km

Comportamiento de CO frente a variables meteorológicas

Al comparar el comportamiento del monóxido de carbono frente a la temperatura, de acuerdo con la literatura, se espera que al disminuir esta variable meteorológica la concentración del contaminante de igual forma disminuya, esto debido a que la masa de los contaminantes se encuentran más caliente por su cercanía con la superficie por lo tanto, tienden a subir por ser una masa más ligera que las masas de aire del ambiente, logrando dispersarse en el aire limpio, es decir, los contaminantes se dispersan por convección. Este comportamiento se observa en la comparación A en el año 2012 (Gráfica 1), en la comparación B en el año 2013 (Gráfica 10), 2016 (Gráfica 19), en la comparación C en los años 2012 (Gráfica 22), 2013 (Gráfica 25), en la comparación D en los años 2014 (Gráfica 40), 2016 (Gráfica 46) y en la comparación E en los años 2014 (Gráfica 58), 2015 (Gráfica 61) y 2016 (Gráfica 64).

Sin embargo, este comportamiento no siempre se presenta a lo largo de todo el año, se puede llegar a presentar un caso inverso donde al disminuir la temperatura del ambiente la concentración del contaminante CO aumente, como es el caso de las demás comparaciones no mencionadas anteriormente, esto se puede deber a diversos factores entre ellos está que el CO es un compuesto que dura muy poco en la atmósfera por ser inestable y transformarse en CO₂ al reaccionar con un radical hidroxilo (OH), causando que no se detecte la concentración del CO. Otro factor importante puede ser la ubicación de la estación atmosférica, debido a que al encontrarse tan cerca de un boulevard principal las emisiones de los automóviles ocasionan mayores concentraciones de este contaminante.

Posteriormente al comparar la relación CO con la precipitación, se espera que, al aumentar la cantidad de precipitación, la concentración del monóxido de carbono disminuya, esto debido a que la precipitación es la forma más común de deposición húmeda, contribuyendo a que los contaminantes reaccionen con el agua, es decir, se oxiden al reaccionar con los OH o el O₂, causando un lavado de este contaminante en el ambiente. Como se observa en casi todos los años de las cinco comparaciones realizadas.

Al igual que con la temperatura no siempre se observa este comportamiento, como para la comparación A en el año 2016 (Gráfica 5), la comparación B en los años 2014 (Gráfica 14), 2016 (Gráfica 20), en la comparación C en los años 2013 (Gráfica 26), 2016 (Gráfica 32), en la comparación D en el año 2015 (Gráfica 44) y en la comparación E en los años 2013 (Gráfica 56), 2014 (Gráfica 59), 2015 (Gráfica 62); esto puede ser causado por la falta de datos, ya que no se presentan datos de precipitación para algunos meses o al reporte de

datos erróneos por parte de la estación atmosférica, debido que al estar rodeada de árboles y cerca de avenidas principales sus mediciones se pueden ver afectadas.

Finalmente, el comportamiento del CO frente a la velocidad del viento, se esperaría que al aumentar la esta variable meteorológica la concentración del contaminante disminuya esto de acuerdo con la bibliografía (Sánchez, 1999), debido a que con una mayor velocidad de vientos el monóxido de carbono se diluye en las masas de aire limpio lo que causa que la concentración del monóxido de carbono disminuya. Sin embargo, no siempre se cumple este comportamiento a lo largo de todo el año.

Los casos en los que no se presenta este comportamiento son en la comparación B en los años 2012 (Gráfica 9), 2015 (Gráfica 18), 2016 (Gráfica 21); en la comparación D en los años 2012 (Gráfica 36), 2013 (Gráfica 39), 2015 (Gráfica 45) y en la comparación E en los años 2012 (Gráfica 54) y 2016 (Gráfica 66); esto puede deberse principalmente a la falta de datos tanto meteorológicos como de la concentración de contaminantes.

Aunque el CO es el principal precursor del dióxido de carbono sin embargo la tasa de conversión de CO a CO₂ es lenta por lo que también se considera que el monóxido de carbono tiene una dispersión regional causando que este contaminante se quede de 2 a 4 meses en la atmósfera, por lo que todo esto repercute en las comparaciones realizadas anteriormente con las variables meteorológicas.

Comportamiento estacional del CO

Durante el periodo analizado se observan altas concentraciones de monóxido de carbono en los meses de primavera (Figura 27), es decir, marzo a mayo, teniendo un promedio 1.949 ppb y con un máximo en el mes de marzo; esto es asociado principalmente a las altas temperaturas que se presentan en estos meses (H. Ayuntamiento de Puebla 2014-2018, 2014).

En cambio, las menores concentraciones de CO, son en verano y otoño, en los meses de julio a noviembre; lo que permite distinguir que las altas precipitaciones en los meses de verano provocadas por la actividad ciclónica, contribuyen a la disminución del contaminante (Protección Civil del Municipio de Puebla, 2010).

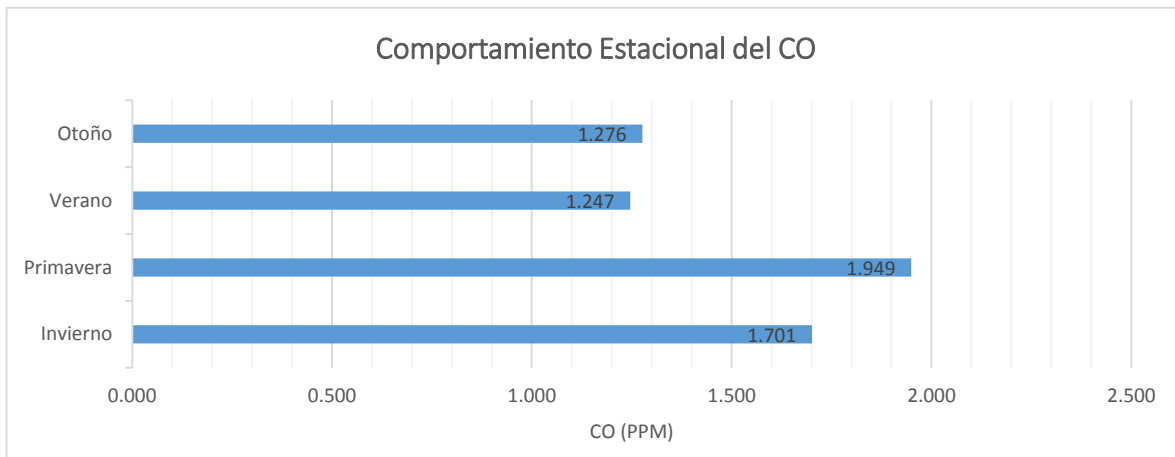


Figura 27 Comportamiento Estacional del Monóxido de Carbono
Fuente: Elaboración propia con datos de la REMA

Comportamiento de NO₂ frente a variables meteorológicas

En el caso de la comparación del comportamiento del NO₂ frente a la temperatura, se espera que al presentarse una menor temperatura se presente una mayor concentración de dióxido de nitrógeno, esto debido, a que la reacción más común en el ambiente por la cual se genera este contaminante se lleva de manera espontánea a bajas temperaturas. Este comportamiento del dióxido de nitrógeno frente a la temperatura se observa en la mayoría de las comparaciones en los diversos años del periodo de estudio.

Sin embargo, en cuatro casos específicos no se cumple este comportamiento, que son la comparación A en el año 2017 (Gráfica 70), en la comparación C en el año 2017 (Gráfica 94), en la comparación D en el año 2016 (Gráfica 106) y en la comparación E en el año 2017 (Gráfica 115), donde la concentración de NO₂ es menor a bajas temperaturas, esto puede deberse a diversas reacciones químicas que presenta el dióxido de nitrógeno en la atmósfera, causando que este desaparezca antes de que sea detectado por la estación de monitoreo atmosférico, dentro de estas reacciones se encuentra el ciclo fotolítico que depende del ozono, y la oxidación tanto de día como de noche.

Para el caso de la relación del dióxido de nitrógeno frente a la precipitación, se espera que el comportamiento de la concentración de NO₂ sea menor en los meses con mayor precipitación, esto debido a que el dióxido de nitrógeno reacciona con el agua y el oxígeno generando ácido nítrico, que, al ser una molécula higroscópica, se absorben en las gotas de agua del ambiente y caen en forma de lluvia, eliminando los NO₂ como un mecanismo natural de la Tierra. Este comportamiento se presenta en la comparación A en el año 2012 (Gráfica 68), en la comparación B en el año 2014 (Gráfica 77), en la comparación C en los

años 2012 (Gráfica 83), 2013 (Gráfica 86), 2015 (Gráfica 89), 2017 (Gráfica 95), en la comparación D en los años 2012 (Gráfica 98), 2016 (Gráfica 101), 2017 (Gráfica 104) y en la comparación E en los años 2012 (Gráfica 107), 2013 (Gráfica 110), 2014 (Gráfica 113).

Por otro lado, en los demás casos restantes no se presentó este comportamiento, es decir, la concentración del NO₂ aumentaba al incrementar la precipitación, esto puede deberse a diversos factores entre ellos están que al ser el NO₂ un contaminante secundario este depende directamente del NO el cual al reaccionar con el agua genera NO₂, causando en algunos casos que exista una mayor concentración de NO₂ en el ambiente cuando se presenta precipitación, sin embargo, no es posible descartar que este comportamiento se puede presentar por la inadecuada ubicación de las estaciones de monitoreo atmosférico y la faltante de datos tanto meteorológicos como atmosféricos.

Finalmente, el dióxido de nitrógeno y a la velocidad de viento, presenta una relación estrecha, debido a que se observa que cuando la velocidad del viento disminuye, la concentración de NO₂ aumenta, y viceversa, cuando se presenta mayor velocidad de viento la concentración de este contaminante criterio disminuye. Debido a que con una mayor velocidad del viento la masa de contaminantes tiene mayor facilidad de diluirse en las masas de aire limpio, este comportamiento se observa en la mayoría de las cinco comparaciones realizadas.

Sin embargo, existen tres casos especiales donde no se presenta este comportamiento en la comparación C en el año 2013 (Gráfica 87) y en el año 2016 (Gráfica 93); en la comparación D para el año 2016 (Gráfica 102), puede ser causado por la falta de datos, ya que para la comparación C en el año 2013 y 2016 presenta menos del 75 % de los datos de la concentración del NO₂.

Comportamiento estacional de NO₂

Las tendencias anuales muestran las máximas concentraciones de dióxido de nitrógeno en invierno, con un máximo en el mes de enero, en cambio, las mínimas ocurren en otoño con un promedio de 15.894 ppb (Figura 28). Esto hace suponer que algunos factores que causan este comportamiento es la velocidad del viento, debido a que los vientos más lentos se presentan de octubre a diciembre (H. Ayuntamiento de Puebla 2014-2018, 2014), causando una mayor concentración del NO₂, mientras que los frentes fríos presentes en invierno (Protección Civil del Municipio de Puebla, 2010), son otro factor causante del comportamiento en aumento de este contaminante, ocasionando descensos bruscos de

temperatura y con ellos la inversión térmica. A su vez el descenso del dióxido de nitrógeno en otoño se puede deber a que en el municipio de Puebla se presenta un periodo de humedad a desde abril hasta octubre (H. Ayuntamiento de Puebla 2014-2018, 2014).

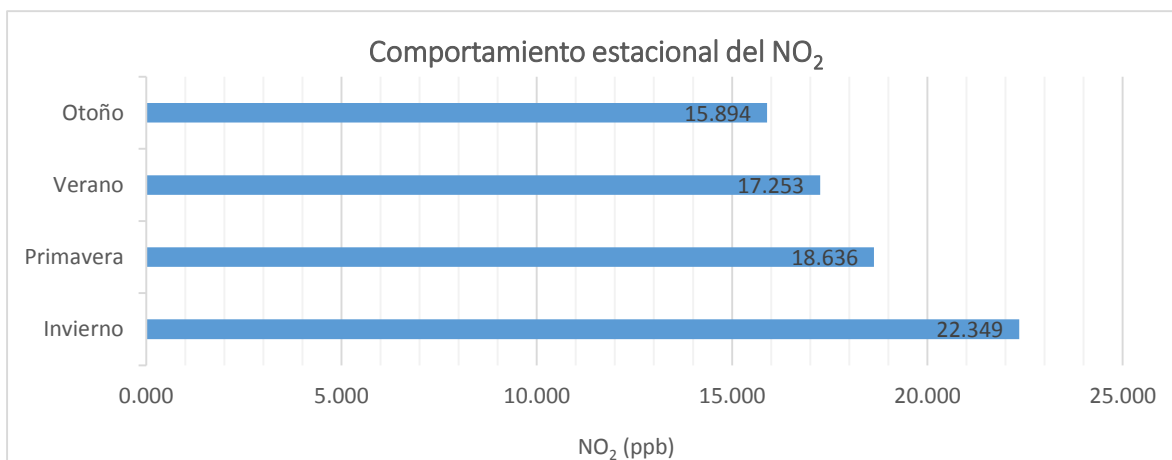


Figura 28 Comportamiento Estacional del Dióxido de Nitrógeno
Fuente: Elaboración propia con datos de la REMA

Comportamiento de SO₂ frente a variables meteorológicas

El comportamiento de la concentración del dióxido de azufre frente a la temperatura de acuerdo con la bibliografía (Sánchez, 1999), se espera que aumente al incrementar la temperatura, esto debido a que en el proceso de combustión se obtienen como óxidos más estables el SO₂ y el SO₃ los cuales tienen una reacción de equilibrio, donde al presentarse una mayor temperatura se verá favorecido el SO₂, mientras que a una menor temperatura se formara el SO₃, esta reacción también dependerá del tipo de mezcla de combustible que se tenga. Este comportamiento se puede observar en algunas de las comparaciones realizadas como en la comparación A en los años 2016 (Gráfica 124), 2017 (Gráfica 127), en la comparación B en el año 2012 (Gráfica 130), en la comparación C en los años 2012 (Gráfica 139), 2013 (Gráfica 142), 2017(Gráfica 151); en la comparación D en los años 2013 (Gráfica 157), 2015 (Gráfica 160), 2016 (Gráfica 163).

Los casos no mencionados anteriormente presentan un comportamiento inverso, es decir, que al aumentar la temperatura la concentración de SO₂ disminuye, puede ser causado por diversos factores, sin embargo, uno de los principales es la generación de SO₃ por la temperatura baja, debido a que en los casos de la comparación D en los años 2012 (Gráfica 154), 2017 (Gráfica 166) y en la comparación E en los años 2014 (Gráfica 169), 2015 (Gráfica 172), 2017 (Gráfica 175); la temperatura oscila entre de los 14 a los 16 °C, siendo una temperatura baja impidiendo la formación del SO₂, sin embargo. para los demás casos

restantes el comportamiento que presentan puede deberse a otros factores como la disponibilidad de datos atmosféricos y meteorológicos, como la ubicación de las estaciones.

Al comparar el comportamiento de la precipitación con el dióxido de azufre, se espera que al presentarse menor precipitación la concentración del SO_2 aumenta y viceversa, esto se debe a que al existir un alto contenido de humedad en el ambiente, el dióxido de nitrógeno reacciona con el agua y el oxígeno, formando ácido sulfúrico, que se integra a las gotas de lluvia que posteriormente cae a la superficie en forma de lluvia ácida causando que la concentración del SO_2 disminuya, este comportamiento se observa en la mayoría de los años de las cinco diferentes comparaciones realizadas.

Sin embargo, existen algunos casos específicos como la comparación B en los años 2016 (Gráfica 134) y 2017 (Gráfica 137); en la comparación C en los años 2012 (Gráfica 140), 2016 (Gráfica 149), 2017 (Gráfica 152), en la comparación D en los años 2012 (Gráfica 155), 2013 (Gráfica 158), 2017 (Gráfica 167) y en la comparación E en los años 2014 (Gráfica 170), 2015 (Gráfica 173); donde no se presenta este comportamiento a lo largo de todo el año, es decir, la concentración de dióxido de nitrógeno aumenta aún cuando se presenta la precipitación más alta del año, esto puede ser causado por la existencia de otra reacción para la formación de ácido sulfúrico, en donde, radicales hidroxilos y la formación de SO_3 causando que la remoción húmeda del SO_2 tenga una variabilidad, sin dejar a un lado la falta de datos tanto meteorológicos como atmosféricos. En el caso de la comparación E se puede ver afectada por su cercanía a las industrias a las fueras del Municipio de Puebla, debido a que estas constituyen el 70 % de las fuentes de donde proviene este contaminante.

Finalmente, al comparar el comportamiento del dióxido de azufre frente a la velocidad del viento, se espera que al aumentar la velocidad del viento la concentración del SO_2 disminuya, debido, a que al encontrarse una mayor velocidad de viento los contaminantes presentan una mayor facilidad para diluirse en las masas de aire limpio, pocos de los años analizado en las diferentes comparaciones cumplen presentan este comportamiento.

Las comparaciones que no presentan el comportamiento anterior son la comparación A en todo el periodo, en la comparación B en los años 2012 (Gráfica 132), 2016 (Gráfica 135), en la comparación C en los años 2013 (Gráfica 144), 2015 (Gráfica 147), 2016 (Gráfica 150), comparación D en los años 2016 (Gráfica 165), 2017 (Gráfica 168) y en la comparación E en los años 2015 (Gráfica 174), 2017 (Gráfica 177), donde se observa una

relación inversa de acuerdo con la literatura, es decir, la concentración del SO_2 aumenta al presentarse una mayor velocidad del viento. Esto puede ser causado por diversos factores, uno de ellos es que este contaminante suele permanecer de 2 a 4 días en el ambiente y se transporta largas distancias, por lo que el aire limpio con el que se mezcla la masa de contaminantes puedan traer consigo SO_2 proveniente de otros lugares causando que la concentración se vea afectada.

Comportamiento estacional de SO_2

Las mediciones de dióxido de azufre, muestran la ocurrencia de máximas concentraciones en primavera, con un promedio de 2.079 ppb, además las menores concentraciones se presentan en verano (Figura 29), este comportamiento se ve influenciado por la cantidad de precipitación en el municipio, debido a que en el área de estudio el clima que se presenta es un régimen de lluvias en verano, causando remoción húmeda y por ende la disminución del contaminante, sin embargo, el periodo de humedad comienza desde mediados del mes de abril (H. Ayuntamiento de Puebla 2014-2018, 2014), ocasionando que la mitad de la primavera no presente el fenómeno de deposición húmeda y como consecuencia una mayor concentración del SO_2 .

Otro factor que influye en las altas concentraciones del dióxido de azufre en primavera es la temperatura, debido a que en los meses con más altas temperaturas en el municipio es abril, mayo, junio (H. Ayuntamiento de Puebla 2014-2018, 2014), por lo que se presenta una mayor dificultad para la dispersión por convección del contaminante. Consecuente a esto se puede observar en la Figura 29 que en invierno, a pesar de las bajas temperaturas la concentración del contaminante es la segunda más alta, esto es causado por los frentes fríos (Protección Civil del Municipio de Puebla, 2010), causantes de la inversión térmica, lo que aumenta la concentración del dióxido de azufre en el área de estudio.

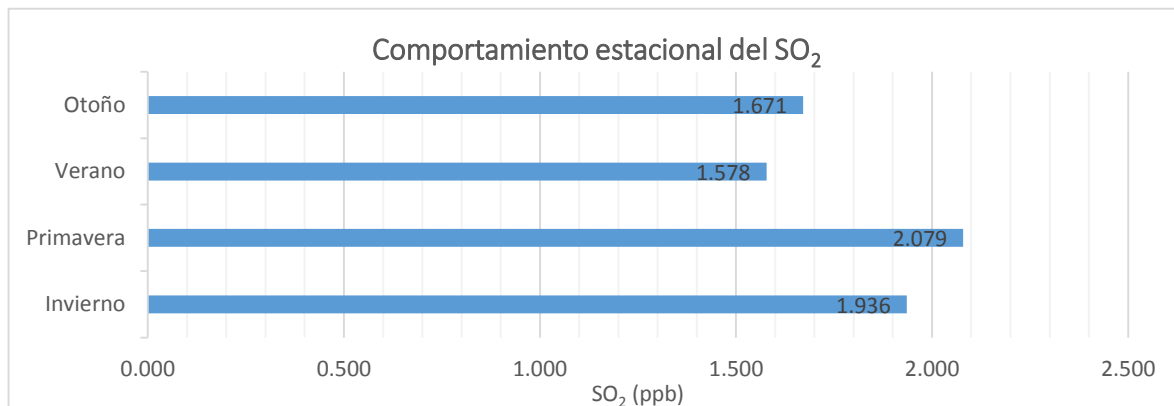


Figura 29 Comportamiento Estacional del Dióxido de Azufre
Fuente: Elaboración propia con datos de la REMA

Comportamiento de O₃ frente a variables meteorológicas

Otro contaminante criterio del cual se comparó su comportamiento con el de la temperatura, es el ozono, donde se espera que frente a una mayor temperatura se presente una mayor concentración de ozono, esto debido a que al ser un contaminante secundario depende principalmente de sus precursores y estos a su vez dependen condiciones adecuadas en el ambiente para su formación, como una temperatura entre 27 a 32 °C y una baja velocidad del viento, con lo que se puede concluir que con una mayor temperatura existirá una mayor concentración de los precursores del ozono y por tanto una mayor probabilidad de que se lleven a cabo las reacciones de formación de este contaminante. Este comportamiento se presenta a lo largo de la mayoría de los años analizados en las cinco diferentes comparaciones realizadas.

Sin embargo, existen algunos casos en los que no se presenta este comportamiento como son en la comparación A en los años 2015 (Gráfica 181), 2016 (Gráfica 184), en la comparación B en el año 2016 (Gráfica 199), en la comparación C en los años 2013 (Gráfica 208), 2017 (Gráfica 217), en la comparación D en el año 2014 (Gráfica 226) y en la comparación E en los años 2013 (Gráfica 241), 2014 (Gráfica 244), 2015 (Gráfica 247), 2016 (Gráfica 250); esto puede causado por diferentes factores, entre ellos está que para la formación del ozono también se puede presentar la reacción con COV de origen natural, óxidos de nitrógeno y oxígeno, que no necesita altas temperaturas para la formación del ozono, esto ocurre típicamente en invierno y se ve reflejado en varias de las comparaciones mencionadas anteriormente.

Por otro lado, se analizó el comportamiento entre el O₃ y la precipitación, de donde se espera de acuerdo con la literatura, que al aumentar la cantidad de precipitación disminuya la concentración del ozono, esto debido principalmente a que el ozono tiende a reaccionar con el agua formando radicales hidroxilos e hidroxilperoxi (HO₂), causando que la concentración del ozono disminuya en el ambiente. Se puede observar este comportamiento en la comparación A en los años 2015 (Gráfica 182), en la comparación B en los años 2012 (Gráfica 191), 2014 (Gráfica 194), 2017 (Gráfica 203), en la comparación C en los años 2012 (Gráfica 206), 2016 (Gráfica 215), 2017 (Gráfica 218), en la comparación D en el año 2013 (Gráfica 224), 2016 (Gráfica 233), 2017 (Gráfica 236) y en la comparación E en los años 2013 (Gráfica 242), 2014 (Gráfica 245), 2016 (Gráfica 251), 2017 (Gráfica 254).

Además, los casos que no se mencionaron, presentaron un comportamiento donde al aumentar la precipitación de igual forma aumentaba la concentración esto se puede deber a diferentes factores, como el que sea un contaminante secundario el cual depende directamente de la disponibilidad de sus precursores como el NO_2 y los COV, sin embargo, no se puede dejar a un lado la falta de datos tantos atmosféricos como meteorológicos y la inadecuada ubicación de las estaciones de atmosféricas.

Finalmente, para el caso de la comparación del ozono con la velocidad del viento, donde se espera que la concentración del ozono aumenta al presentarse una menor velocidad del viento, esto debido a que de acuerdo con lo mencionado anteriormente al ser un contaminante secundario el ozono depende de sus precursores que a la vez estos dependen de una temperatura alta y ausencia de viento, es decir, que con una menor velocidad de viento se presentara más cantidad de precursores y por ende una mayor probabilidad de formación del ozono. Este comportamiento se observa en la mayoría de los años en las cinco comparaciones realizadas.

Sin embargo, se presentaron algunos casos que no siguen este patrón como en la comparación A en el año 2012 (Gráfica 180), en la comparación B en los años 2012 (Gráfica 192), 2015 (Gráfica 198), en la comparación D en los años 2012 (Gráfica 222), 2015 (Gráfica 228) y en la comparación E en los años 2012 (Gráfica 240), 2013 (Gráfica 243), 2014 (Gráfica 246), 2015 (Gráfica 249), esto puede deberse a la faltante de datos, así como a la dependencia a los precursores.

Comportamiento estacional de O_3

El comportamiento estacional del ozono muestra a lo largo del periodo de estudio, que en verano se encuentra una mayor concentración del contaminante, con un máximo en el mes de julio (Figura 30), causado principalmente por la presencia de las condiciones requeridas para la formación de este contaminante, que son ausencia de viento, altas temperaturas y alta radiación solar (Wark & Warner, 2012); además, que en el mes de junio se presentan algunas de las temperaturas más altas del municipio, contribuyendo a la formación del ozono.

En cambio, las bajas concentraciones de O_3 se presentan en invierno, debido a que, en los meses de diciembre a febrero por la falta de condiciones favorables para su formación, ya que las temperaturas regularmente son bajas, al igual que la relación solar, además de recordar que el ozono su formación en gran medida depende de sus precursores.

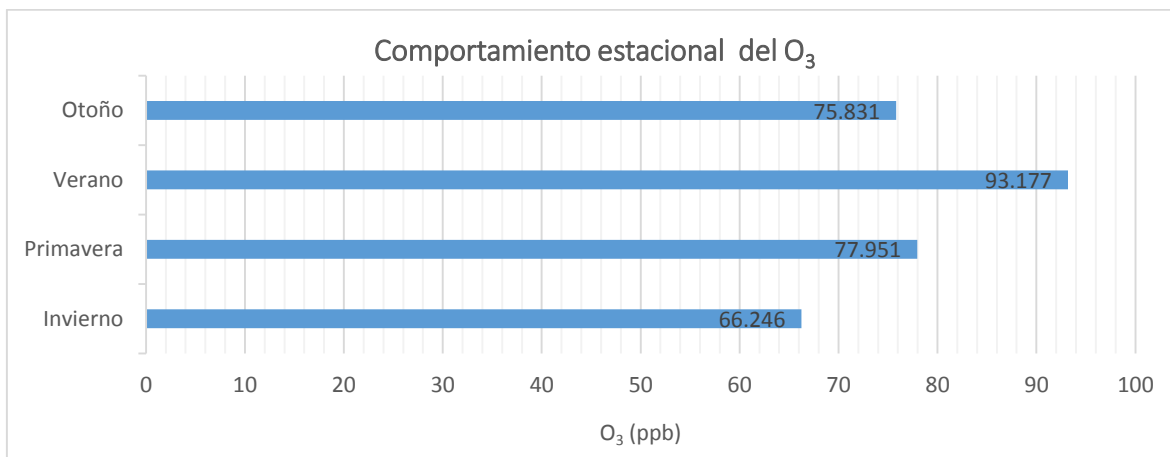


Figura 30 Comportamiento Estacional del Ozono
Fuente: Elaboración propia con datos de la REMA

Comportamiento de PM_{2.5} y PM₁₀ frente a variables meteorológicas

En el caso de las partículas, se realizó de igual forma la comparación de la concentración de las PM_{2.5} y PM₁₀ frente a las variables meteorológicas, temperatura, precipitación y velocidad del viento. Las partículas con diámetro aerodinámico menor a 2.5 y a 10 micras se espera que presenten una relación donde al aumentar la temperatura del ambiente también aumenta la concentración, este comportamiento se debe a que las partículas se quedan atrapadas en la superficie por tener una menor temperatura que la del ambiente y no pueden dispersarse por convección. En los casos que se presentó este comportamiento son la comparación A en los años 2017 (Gráfica 265) para las PM_{2.5}, y en el 2016 (Gráfica 274) para las PM₁₀, en el caso de la comparación B se observa este comportamiento en los años 2012 (Gráfica 280), 2015 (Gráfica 283) para las PM_{2.5} y en el 2012 (Gráfica 292), 2014 (Gráfica 295), 2016 (Gráfica 301) para las PM₁₀, en la comparación C se presentó en los años 2012 (Gráfica 307), 2016 (Gráfica 313) para las PM_{2.5} y en el 2016 (Gráfica 325) para las PM₁₀, en la comparación D se observa este comportamiento en los años 2013 (Gráfica 334), 2016 (Gráfica 343) para las PM_{2.5} y en el año 2016 (Gráfica 361) para las PM₁₀; finalmente de en la comparación E en el año 2014 (Gráfica 376), 2016 (Gráfica 382) para las PM₁₀.

Por otro lado, en la mayoría de los casos se presenta un comportamiento contrario, es decir, al aumentar la temperatura la concentración de las partículas disminuye, en estos casos este comportamiento se presenta en los dos primeros y últimos meses del año, por lo que este comportamiento se atribuye a que no solo la temperatura influye en el comportamiento de la concentración de las partículas sino también a la precipitación y al ser estos los meses con menos precipitación causan que a pesar de existir una baja temperatura la

concentración de partículas sea mayor por la falta de remoción húmeda, sin embargo, no se puede descartar la falta de datos tanto de la concentración de partículas.

Al comparar la precipitación con el comportamiento de la concentración de las $PM_{2.5}$ y PM_{10} se espera que al aumentar la precipitación la concentración de las partículas disminuye y viceversa, esta relación se debe a que la mayoría de este tipo de partículas está constituido por ácidos nítrico y sulfúrico los cuales al haber humedad pueden absorberse fácilmente en las gotas de lluvia y caer como precipitación. Este comportamiento se presenta en la mayoría de los años en las cinco comparaciones realizadas.

Sin embargo, presentaron algunos casos donde no se observa esta relación contaminante-variable meteorológica, estos casos son en la comparación A en los años 2016 (Gráfica 263) para las $PM_{2.5}$, en la comparación B en los años 2015 (Gráfica 284) para las $PM_{2.5}$ y en el año 2015 (Gráfica 299) para las PM_{10} ; en la comparación C en los años 2015 (Gráfica 311), 2016 (Gráfica 314) para las $PM_{2.5}$ y en los años 2015 (Gráfica 323), 2016 (Gráfica 326) para las PM_{10} , Por otro lado para el caso de la comparación D se presenta este comportamiento en los años 2016 (Gráfica 344) para las $PM_{2.5}$ y en el año 2016 (Gráfica 362) para las PM_{10} ; finalmente, en la comparación E se presenta en los años 2013 (Gráfica 368), 2014 (Gráfica 371) para $PM_{2.5}$ y en los años 2014 (Gráfica 377), 2015 (Gráfica 380) para PM_{10} . Esto se puede deber a que la concentración de las partículas sea tan grande que la precipitación no sea capaz de removerla en su totalidad, se debe considerar que estos contaminantes pueden permanecer hasta dos semanas en la atmósfera.

Finalmente, al comparar el comportamiento de las partículas PM_{10} y $PM_{2.5}$ frente a la velocidad del viento, se espera que al disminuir la velocidad del viento la concentración de ambas partículas aumenten esto es debido a que la remoción seca no se puede llevar a cabo, ya que las partículas no se impactan a la superficie con la velocidad necesaria para ser adheridas a esta, causando que se queden en el ambiente hasta ser depositadas por remoción húmeda o por gravedad, donde el tiempo dependerá del diámetro de la partícula; este comportamiento se observa en la mayoría de los años en las cinco comparaciones realizadas. Por otro lado, se presentaron algunos casos donde no fue así, que son la comparación A en el año 2015 (Gráfica 261) para las $PM_{2.5}$ y en el 2012 (Gráfica 270), 2016 (Gráfica 276) para las PM_{10} , en la comparación C en los años 2012 (Gráfica 309), 2015 (Gráfica 312), 2017 (Gráfica 318) para $PM_{2.5}$, además de en los años 2016 (Gráfica 324) y 2017 (Gráfica 330) para las PM_{10} ; en la comparación D en los años 2012 (Gráfica 333), 2013 (Gráfica 336), 2016 (Gráfica 345) para $PM_{2.5}$ y en 2012 (Gráfica 351), 2016 (Gráfica

363), 2017 (Gráfica 366) para PM_{10} , finalmente, en la comparación E en el año 2015 (Gráfica 381) para las PM_{10} . Esto puede ser causado por diversos factores, sin embargo debe mencionarse que en los meses que se presenta este comportamiento inverso es en los meses con más lluvia que son de mayo a octubre para el Municipio de Puebla, causando que exista una disminución de la concentración de partículas a pesar de una baja velocidad del viento.

Comportamiento estacional de Material Particulado

Durante el periodo analizado se muestra mayor concentración de PM_{10} en invierno (Figura 31), con un máximo en febrero, mientras que las $PM_{2.5}$ (Figura 32) comparten el mismo comportamiento, con la diferencia, de que estas, además de invierno, también tienen gran concentración de material particulado en primavera con un promedio de $26 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para ambas estaciones del año. Demostrando que, en invierno, se aumenta la concentración debido a que los frentes fríos presentes de noviembre a marzo en el municipio (Protección Civil del Municipio de Puebla, 2010), los cuales causan un descenso brusco de temperatura y la mayoría de veces inversión térmica, donde las partículas quedan atrapadas sin poder dispersarse.

En cambio, para las menores concentraciones de PM_{10} (Figura 31) se presentan en verano con un promedio de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en otoño con un promedio de $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$, este mismo comportamiento es reflejado por las $PM_{2.5}$ (Figura 32), con un promedio de $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para ambas estaciones del año, esto está influenciado por la precipitación y velocidad del viento, debido a que en el municipio de Puebla se presenta una mayor precipitación en los meses de mayo hasta octubre (H. Ayuntamiento de Puebla 2014-2018, 2014), causando remoción húmeda y por ende disminución del contaminante, además que los vientos en verano son húmedos por provenir de vientos alisios del golfo de México causando una mayor humedad en el ambiente y por otro lado la baja velocidad de los vientos predominante de octubre a diciembre, ocasiona una menor suspensión del material particulado otoño, disminuyendo su concentración para esta época del año.

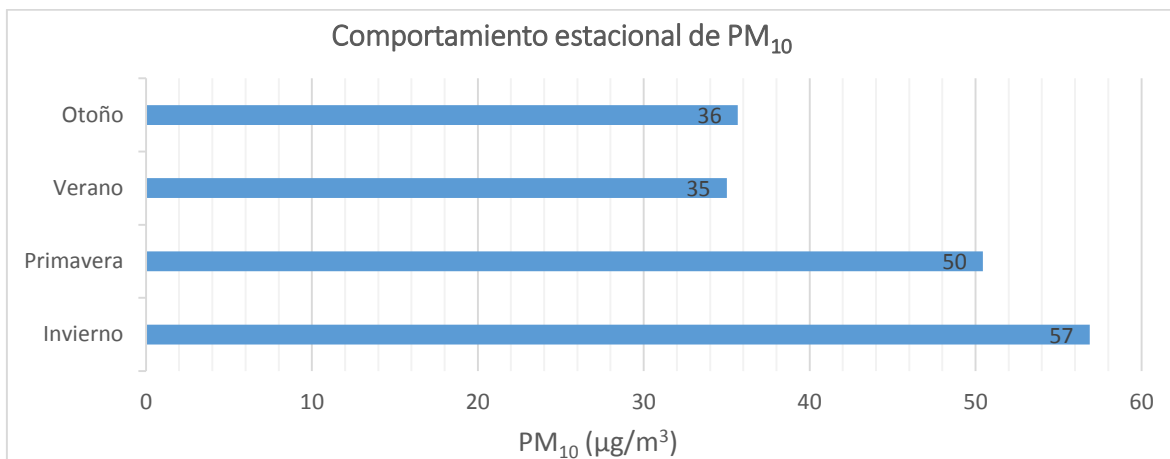


Figura 31 Comportamiento Estacional PM₁₀
Fuente: Elaboración propia con datos de la REMA

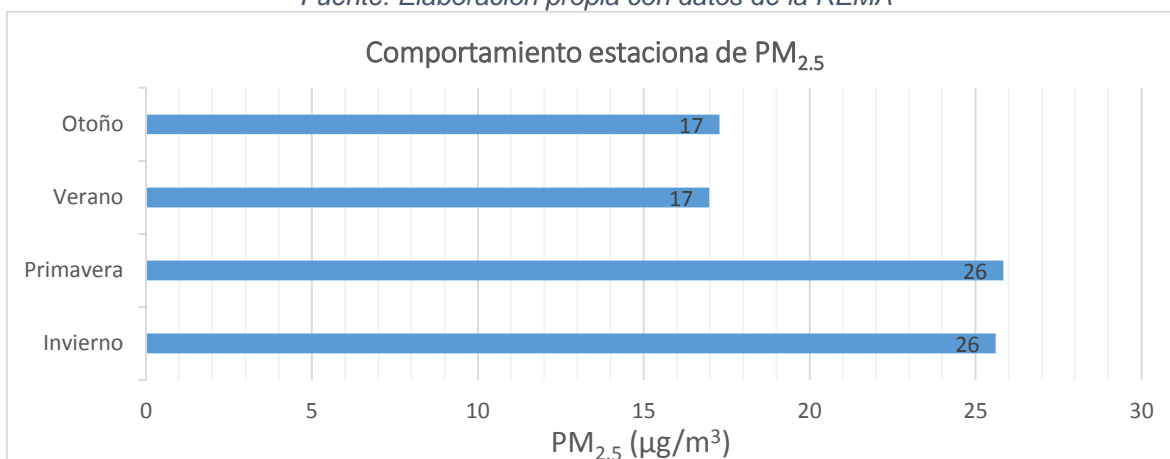


Figura 32 Comportamiento Estacional PM_{2.5}
Fuente: Elaboración propia con datos de la REMA

Dirección del viento

La dirección del viento presenta una relación con las estaciones del año, debido a que en verano-otoño tienen un promedio de 3.2 m/s mientras que en invierno-primavera el promedio de la velocidad es de 1.8 m/s (Protección Civil del Municipio de Puebla, 2010), además, que los vientos dominantes se orientan al Noroeste durante la mañana y cambia su dirección por las tardes dirigiéndose al sursuroeste. Por otro lado, la velocidad del viento presenta una relación de igual manera, ya que en verano y otoño provienen del norte y noreste, mientras que en él invierno y primavera mayormente provienen del sur y sureste (H. Ayuntamiento de Puebla 2014-2018, 2014).

A continuación, se muestra la dirección de los vientos predominante de acuerdo con los datos reportados por las estaciones meteorológicas analizadas en el periodo 2012-2017.

Estación DIAU



Figura 33 Rosa de vientos de estación DIAU 2012-2017
Fuente: Elaboración propia

La rosa de vientos (Figura 33) muestra que los vientos se dirigen hacia al Norte y al NNE con una velocidad de entre 0.5 a 3.6 m/s, por lo que se concluye que los vientos provienen del Sur, a pesar de que estos vientos provienen del sur al encontrarse esta estación en el centro de la ciudad de Puebla, arrastrarán mayormente contaminantes provenientes de automóviles, estos reaccionarán con los contaminantes del Norte del municipio que tendrán una mayor concentración por la cantidad de industrias en el Norte del Municipio.

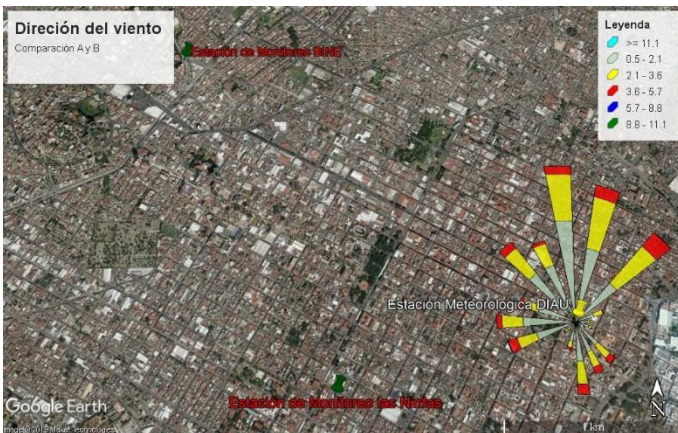


Figura 34 Dirección del viento en comparaciones A y B
Fuente: Elaboración Propia

Para el caso de las comparaciones A Y B, que se realizaron con esta estación meteorológica y las estaciones atmosféricas Ninfas y BINE respectivamente (Figura 34). Se determina que la estación Ninfas no se verá afectada por el fenómeno descrito anteriormente debido a que estas se encuentran al Suroeste de la estación meteorológica, sin embargo, estación BINE, podría verse afectada por este fenómeno debido a que se encuentra al Noroeste de la estación meteorológica, además que por su cercanía con el parque industrial 2000, presentara mayor concentración de contaminantes.

Estación UPN

En la rosa de los vientos (Figura 35) se observa que los vientos se dirigen hacia dos zonas al Noreste y a Sur con una velocidad de entre 0.5 a 3.6 m/s, con lo que se concluye que los vientos provienen mayormente del Suroeste y del Norte los vientos provenientes de SO se considera que estos arrastrarán una menor cantidad de contaminantes, ya que al Sur del

municipio de Puebla se encuentra mayormente casas-habitación, mientras que los vientos provenientes del Norte pueden arrastrar mayor concentración de contaminantes emitido por fuentes fijas que se encuentran al Norte del municipio. Al dirigirse estos vientos al Suroeste y del Norte puede causar una sinergia entre los contaminantes emitidos en el lugar y por los que serán arrastrados por los vientos.

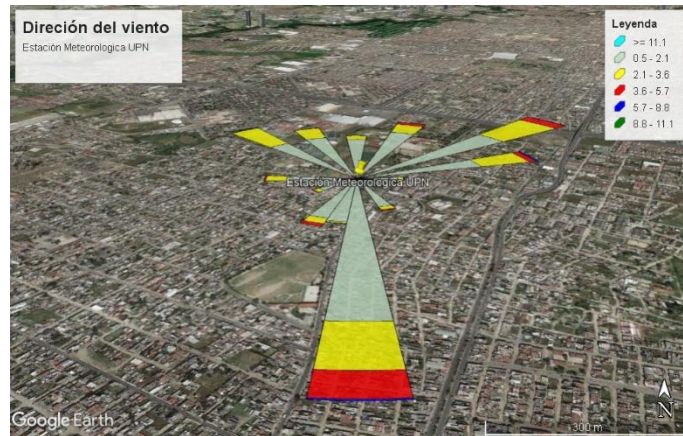


Figura 35 Rosa de vientos de estación UPN 2012-2017
Fuente: Elaboración propia



Figura 36 Dirección del viento en la comparación C
Fuente: Elaboración Propia

Para el caso de la comparación C (Figura 36), realizada entre esta estación meteorológica y la estación atmosférica Agua Santa se concluye que se puede ver afectada por los contaminados arrastrados por el viento debido a que la estación atmosférica se encuentra ubicada al Noroeste de la estación meteorológica, sin embargo, esta estación se verá afectada por

emisiones de automóviles y en menor medida por emisiones por parte de la industria debido a su lejanía de estas.

Estación Observatorio

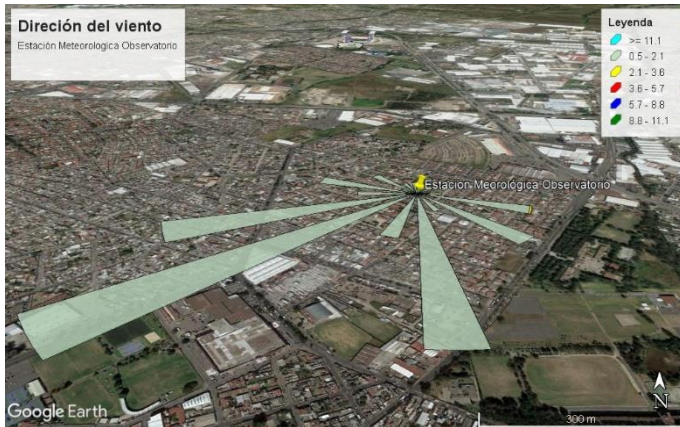


Figura 37 Rosa de vientos de estación Observatorio 2012-2017

Fuente: Elaboración propia

La rosa de los vientos (Figura 37) muestra que los vientos dominantes se dirigen al Suroeste con una velocidad promedio de entre 0.5 a 2.10 m/s, por lo anterior se puede concluir que los vientos provienen del Noreste, por lo que estos vientos arrastran consigo una cantidad importante de contaminantes provenientes de las industrias hacia la zona sur del municipio donde

existirá una sinergia entre los contaminantes de la zona sur que serán mayor mente de fuentes móviles y los contaminantes provenientes de las industrias que se encuentran al Norte del municipio de Puebla.

En el caso de la comparación D (Figura 38) no se verá afectada la concentración de los contaminantes reportados por la estación UPN, debido a que los vientos se dirigen al SO, mientras que esta estación de monitoreo atmosférico se encuentra al NE de la estación meteorológica, sin embargo, las concentraciones de contaminantes reportadas por esta estación UPN si se verá afectada en gran medida por el parque industrial 2000 debido a su cercanía con este.



Figura 38 Dirección del viento en la comparación D

Fuente: Elaboración Propia

Estación Echeverría



Figura 39 Rosa de vientos de estación Echeverría 2012-2017

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con la rosa de los vientos (Figura 39) los vientos se dirigen al Sur con una velocidad de 0.5 a 2.1 m/s, por lo que se puede concluir que los vientos provienen principalmente del Norte, al provenir estos vientos podrían contener una pequeña cantidad de contaminantes provenientes de la industria sin embargo será muy pequeña debido a que esta estación se encuentra alejada de los principales parques industriales del Municipio. Al ser llevados estos contaminantes hacia el sur podría causar una mayor concentración de contaminantes en esta zona a pesar de que aquí se encuentre mayor mente casas-habitación.

En el caso de la comparación E (Figura 40), el reporte de la concentración de los contaminantes por parte de la estación atmosférica Velódromo no serán afectadas por el fenómeno descrito anteriormente debido a que esta estación se encuentra al Norte de la estación meteorológica, esta comparación se consideró a pesar de que la estación Velódromo se encuentra fuera del municipio de Puebla con la finalidad de ver el comportamiento de los contaminantes en lugares cerca de la zona de estudio.



Figura 40 Dirección del viento en la comparación D
Fuente: Elaboración Propia

Tendencia anual de la concentración de los contaminantes criterio

A pesar de ya haber analizado el comportamiento de los contaminantes criterio frente a las variables meteorológicas, se consideró relevante observar la tendencia de la concentración del O_3 , NO_2 , SO_2 , $PM_{2.5}$ y PM_{10} a lo largo del periodo 2012-2017, con la finalidad de observar que tanto ha repercutido en estos el crecimiento poblacional, el crecimiento del parque vehicular y de las industrias, pero sobre todo los efectos positivos causados por los programas implementados para la mejora de la calidad del aire en el área de estudio.

Comportamiento del O_3 en el Municipio de Puebla

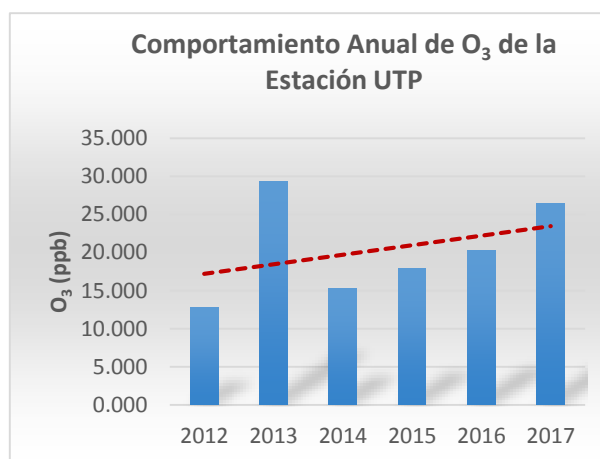
Uno de los contaminantes que más afecta al Municipio de Puebla de acuerdo con los estudios realizados anteriormente es el O_3 , es por esto que se realiza un análisis de la tendencia que ha tenido este contaminante en las diferentes estaciones de monitoreo atmosférico.



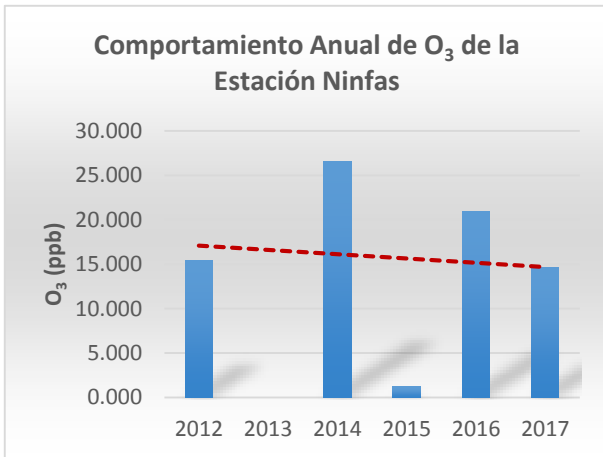
Gráfica 385 Comportamiento O_3 en estación Agua Santa
Fuente: Elaboración propia

partes por billón (ppb) de O_3 para el año 2013 tuvo una disminución considerable, sin embargo, la tendencia que presenta el O_3 para el periodo analizado es un incremento de su concentración a lo largo de los años como se observa en la Gráfica 385, este incremento se puede deber a diversos factores, uno de ellos es el aumento del parque vehicular del municipio, ya que de acuerdo con el INEGI en el 2012 se tenían 566,649 autos

Es importante recordar que el ozono es un contaminante secundario y sus principales precursores son el monóxido de carbono, los óxidos nítricos y los compuestos orgánicos volátiles, al provenir de las emisiones producidas por los automóviles, se debe considerar que el aumento del parque vehicular en el municipio de Puebla afecta directamente la concentración del ozono. Para la estación de Agua Santa se puede observar que la concentración en



Gráfica 386 Comportamiento O_3 en estación UTP
Fuente: Elaboración propia



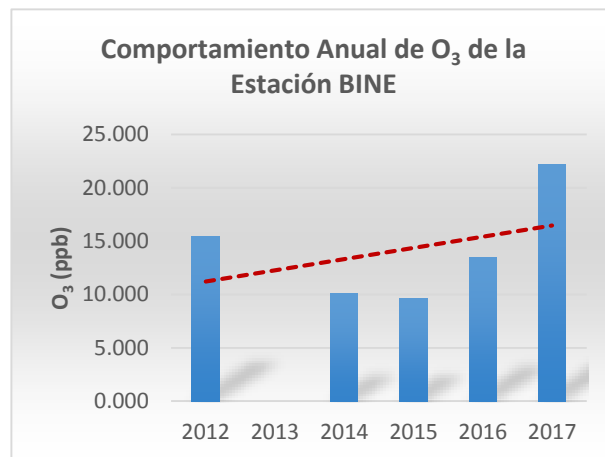
Gráfica 387 Comportamiento O₃ en estación Ninfas
Fuente: Elaboración propia

registrados, mientras que en 2017 aumentó un 12 % con un total de 638,346 autos registrados, por lo que este crecimiento causa un aumento del monóxido de carbono e indirectamente un aumento del ozono. Otro factor importante para la acentuación del ozono en el municipio de Puebla es la falta de un programa de regularización de la circulación de autos como en otros estados, sin embargo, es importante

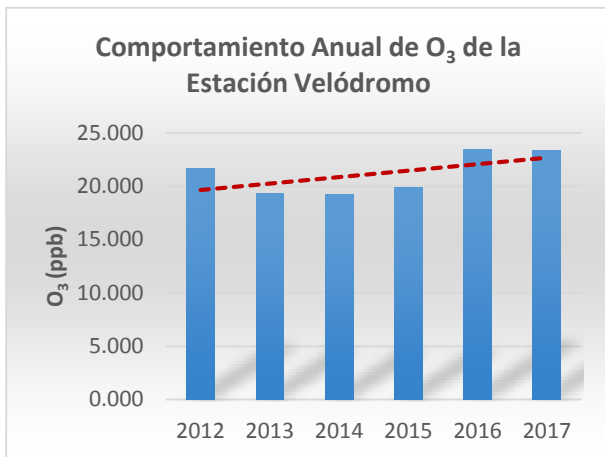
mencionar que, si existen algunas estrategias como la promoción de verificación de autos, el desarrollo de sistemas de semaforización entre otros que se abordan el Programa de Acción Climática Municipal (PACMUN); finalmente, el faltante de datos puede ser un factor para la obtención de este comportamiento.

Por otro lado, para la estación de monitoreo atmosférico ubicada en la Universidad Tecnológica de Puebla como se observa en la Gráfica 386, se presenta un incremento de la concentración año con año a pesar de que ha disminuido en comparación con la concentración de O₃ en 2013.

En la estación de monitoreo atmosférico las Ninfas (Gráfica 387) se puede observar la faltante de datos en los años 2013 y 2015, por lo que no se puede hacer una comparación certera del comportamiento de la concentración de O₃ en este periodo para esta estación. Mientras que en la estación de BINE, a pesar de no contar con un año de datos, se puede observar nuevamente que la concentración de O₃ monitoreada por esta estación se ha incrementado (Gráfica 388) sobre todo en el año 2017. Sin embargo, en los años del 2014 al 2016 se presentó un descenso de la concentración del ozono, este comportamiento al igual que en las estaciones anteriores se puede deber al crecimiento del parque vehicular.



Gráfica 388 Comportamiento O₃ en estación BINE
Fuente: Elaboración propia

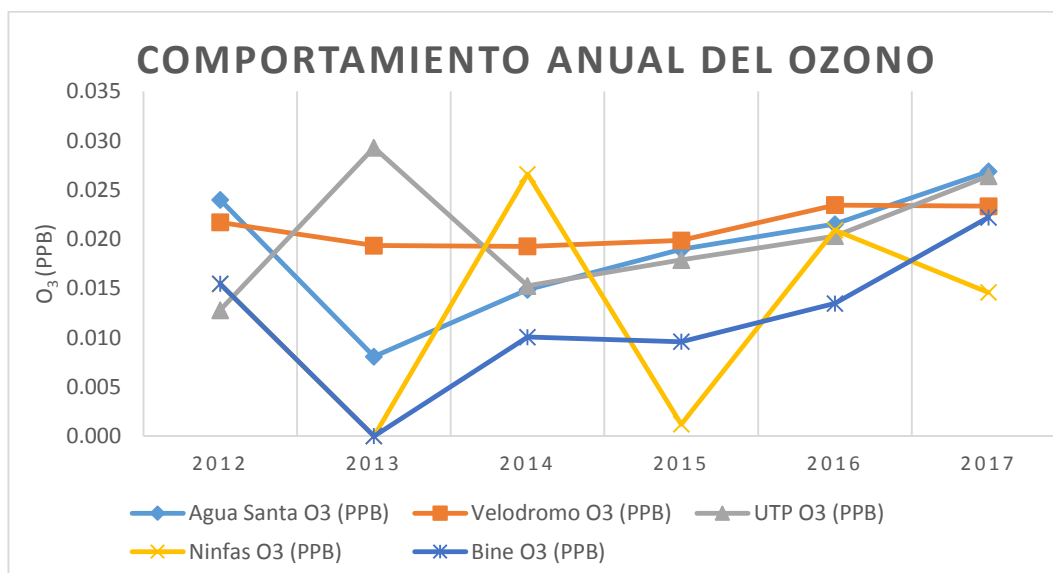


Gráfica 389 Comportamiento O₃ en estación Velódromo
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en la estación de Velódromo, a pesar de no encontrarse en el Municipio de Puebla se puede observar un comportamiento de incremento de la concentración del ozono, al igual que en las estaciones anteriores (Gráfica 389), este comportamiento demuestra que los contaminantes no solo afectan la zona donde son emitidos, sino también zonas aledañas.

En conclusión, la concentración de ozono ha variado respecto a los años y la estación en que fue monitoreado, sin embargo, en la mayoría de estaciones de monitoreo atmosférico se encontró una tendencia de aumento de la concentración de este contaminante, como se puede observar en la Gráfica 390, es por esto que a pesar de la existencia de estrategias establecidas en el PACMUN y en el Plan Municipal de Desarrollo 2014-2018 se les dé un seguimiento y verificación de su cumplimiento, ya que con la reducción de ozono contribuye a una mejor calidad de aire para la sociedad; además de prevenir la corrosión de materiales y el deterioro de cultivos.

En conclusión, la concentración de ozono

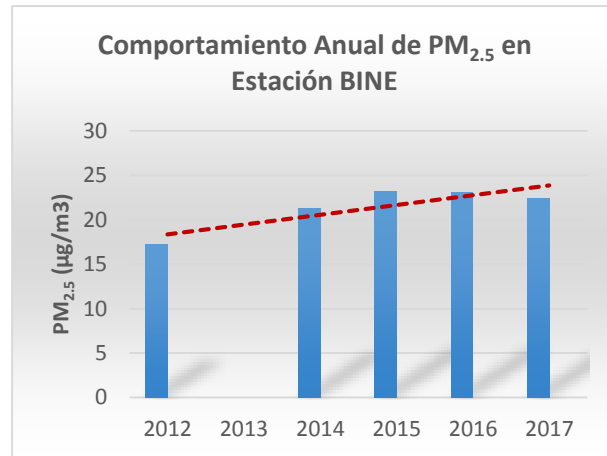


Gráfica 390 Comportamiento Anual del Ozono en el periodo 2012-2017
Fuente: Elaboración propia

Comportamiento de PM_{2.5} en el Municipio de Puebla

Las partículas con diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micras (μm) son uno de los contaminantes que debe ser monitoreado con especial atención debido a que los daños que puede causar al ser humano son mortales, por este motivo por medio de este análisis se determinara la tendencia que tiene la concentración de las PM_{2.5} en los años del 2012 al 2017.

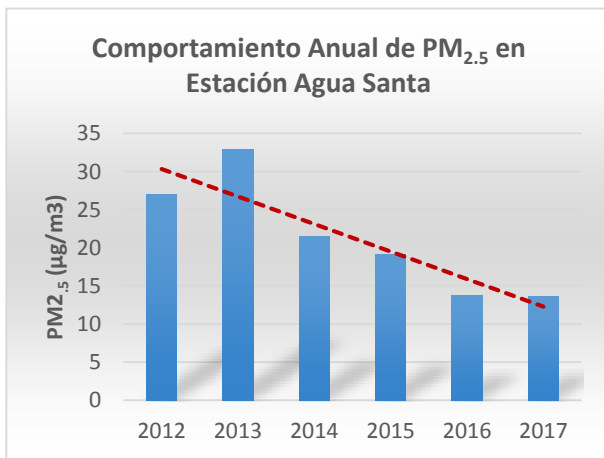
En la estación de monitoreo atmosférico BINE (Gráfica 391), se presentó una tendencia de incremento, sin embargo, se tiene una deficiencia de datos, debido a que no se cuenta con un año para poder realizar una comparación más certera entre el periodo señalado, sin embargo, esta tendencia se puede deber en gran medida como en el caso del ozono al aumento del parque vehicular en el



Gráfica 391 Comportamiento PM_{2.5} en estación BINE
Fuente: Elaboración propia

municipio de Puebla, además del incremento de las industrias debido a que estas partículas tienen su origen principalmente en la quema de combustibles fósiles, otro factor importante para su incremento es la creación de nuevas viviendas en el municipio, debido a que una fuente relevante de las partículas es la construcción (Crespo, 2017), y al presentarse en los últimos años en el municipio 180 asentamientos irregulares (SEMARNAT, 2013) causa la construcción de varias viviendas emitiendo gran número de PM_{2.5}.

Para la estación de monitoreo atmosférico ubicada en Agua Santa, la tendencia de la

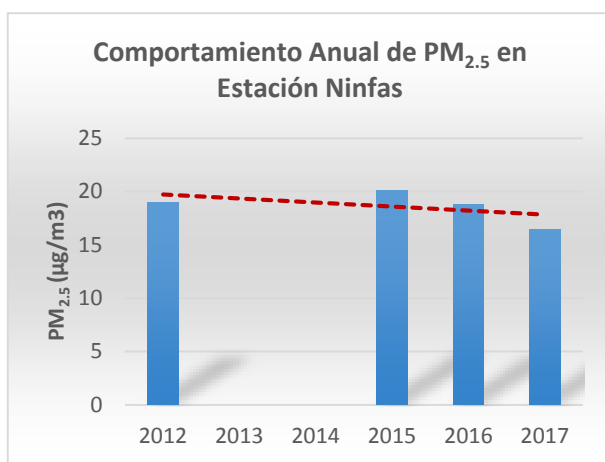


Gráfica 392 Comportamiento PM_{2.5} en estación Agua Santa
Fuente: Elaboración propia

concentración de PM_{2.5} es diferente a la estación anterior (Gráfica 392), ya que ha disminuido y para el año 2016 se presentó la concentración más baja de 13.6 mg/m³, este comportamiento puede ser causado por mejoras en infraestructura vial para el fomento del uso de la bicicleta como se estableció en el Plan Municipal de desarrollo 2011-2014, así como la política de calentadores solares de agua donde se

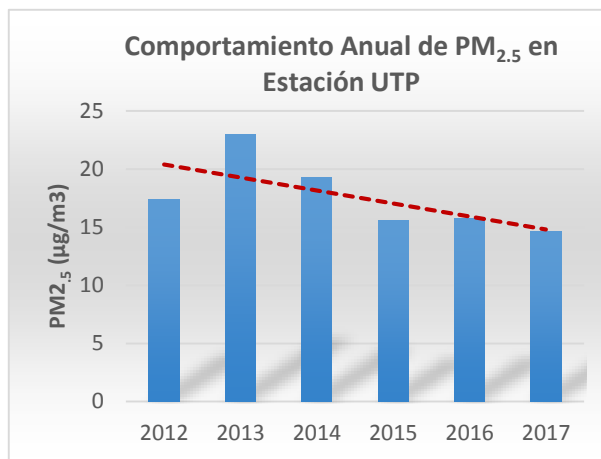
busca que la industria, comercios y nuevas casas habitación cuenten con esta tecnología que se estableció en el PACMUN, además de ejecución de estrategias establecidas en el Plan de Desarrollo Municipal 2011-2014 para el control de emisiones de fuentes fijas y la inspección del cumplimiento de la NOM-085-SEMARNAT-1994.

Mientras que en la estación de monitoreo



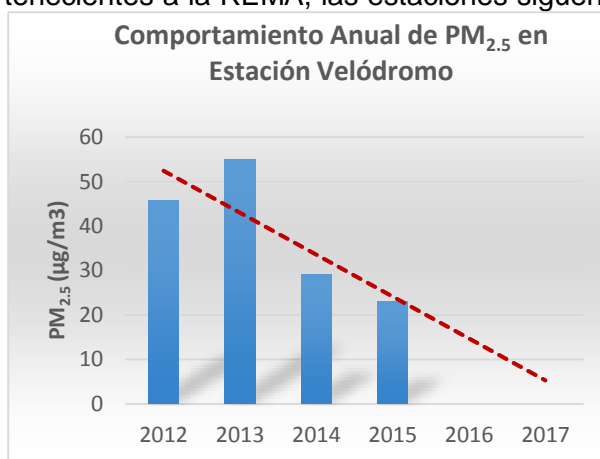
Gráfica 394 Comportamiento PM_{2.5} en estación Ninfas
Fuente: Elaboración propia

las estaciones de monitoreo atmosférico pertenecientes a la REMA, las estaciones siguen presentando deficiencia de datos por lo que los instrumentos de medición de partículas pueden no encontrarse en condiciones óptimas, lo cual puede alterar la medición de estos contaminantes criterio. Por otro lado, para la estación ubicada en las Ninfas (Gráfica 394) se tienen muy pocos datos por lo que no se puede hacer un análisis certero del comportamiento de las partículas con los datos obtenidos en esta estación de monitoreo atmosférico.



Gráfica 393 Comportamiento PM_{2.5} en estación UTP
Fuente: Elaboración propia

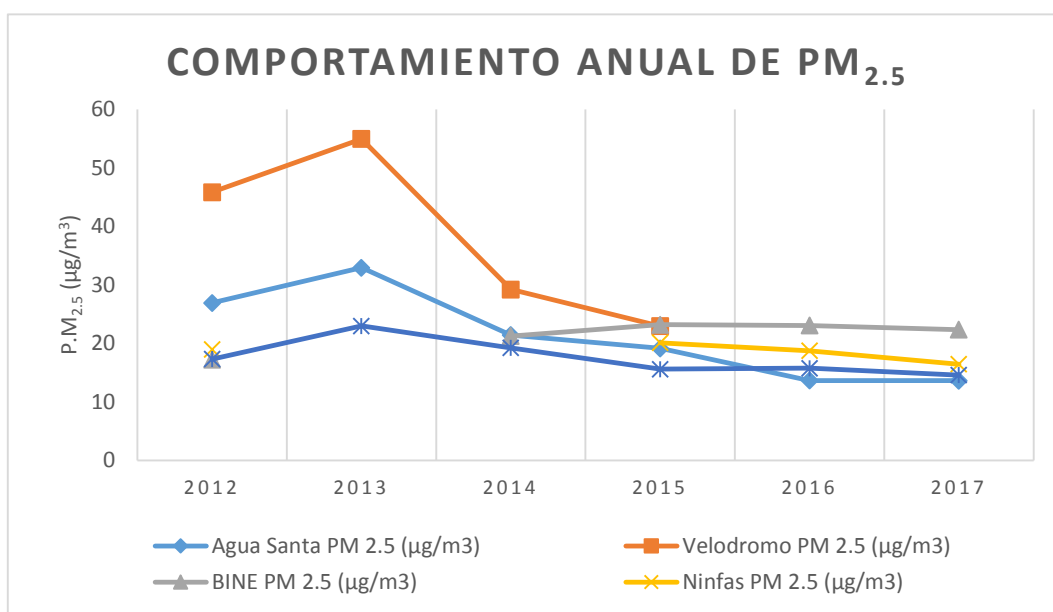
atmosférico ubicada en la UTP, como se observa en la Gráfica 393, la concentración de las partículas 2.5µm, ha tenido un comportamiento variable, sin embargo, la línea de tendencia de la concentración de este contaminante es descendente, que se puede deber a los mismos factores mencionados en la estación anterior, sin embargo, tanto en el PACMUN como en el Programa de Gestión de la Calidad del Aire del Estado de Puebla se propone mejorar a



Gráfica 395 Comportamiento PM_{2.5} en estación Velódromo
Fuente: Elaboración propia

Finalmente, en la estación de Velódromo (Gráfica 395), igual que la estación Ninfas no se puede determinar una tendencia certera de la concentración $PM_{2.5}$ debido a la faltante de datos que se tienen para esta estación.

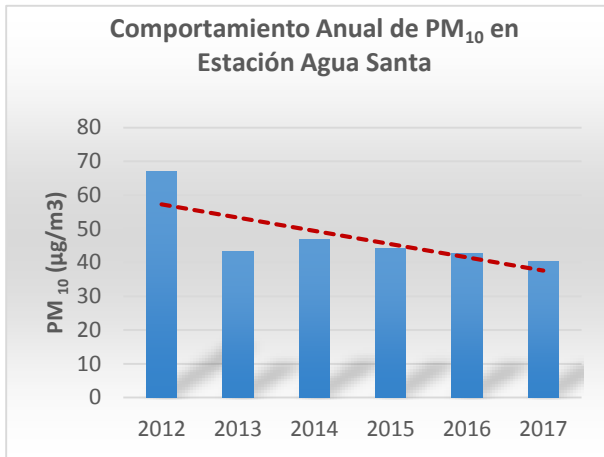
En conclusión, respecto a la concentración de $PM_{2.5}$ se puede observar en la Gráfica 396 que en la mayoría de las estaciones de monitoreo atmosférico presentan una tendencia de disminución, por lo menos para los últimos años analizados, esto se puede deber a la implementación de estrategias para el control de la contaminación del aire, no obstante, es importante que no se dejen de implementar estas estrategias, así como nuevas para el control de este contaminante ya que es uno de los más peligrosos para el ser humano y de los que más difíciles de remover.



Gráfica 396 Comportamiento Anual del $PM_{2.5}$ en el periodo 2012-2017
Fuente: Elaboración propia

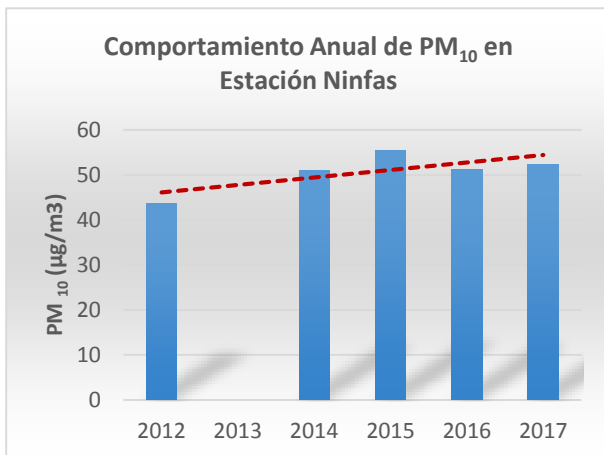
Comportamiento de PM_{10} en el Municipio de Puebla

Uno de los contaminantes por el cual se han estado realizando proyectos para disminuir su concentración en el municipio de Puebla son las PM_{10} , debido a que actualmente se ha disminuido su concentración en años anteriores se mantenía muy por arriba de los límites permisibles marcados por la NOM-025-SSA1-2014. Es importante recordar que las $PM_{2.5}$ las PM_{10} tienen como fuente principal la quema de combustible fósiles, la generación de energía eléctrica y ceniza volcánica.



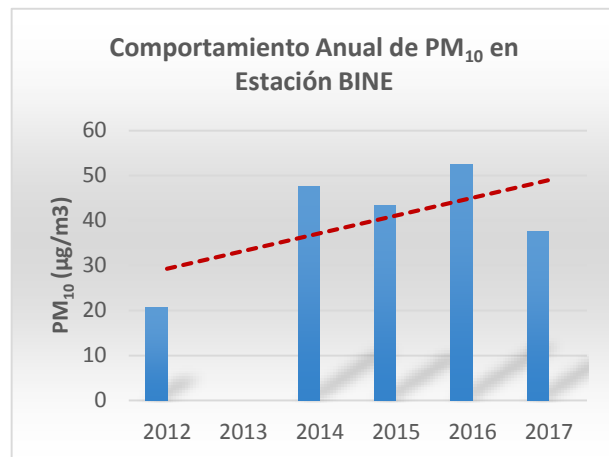
Gráfica 397 Comportamiento PM₁₀ en estación Agua Santa Fuente: Elaboración propia

PACMUN como la reconversión tecnológica en el comercio y la industria que se basa en la sustitución del combustible fósil, además de las que se implementaron en el Plan Municipal de Desarrollo 2011-2014 de las cuales se basan en el control de fuentes fijas de competencia municipal a través de la licencia de funcionamiento y el inventario anual de fuentes fijas, reduciendo las emisiones de fuentes fijas y por ende la generación de partículas.



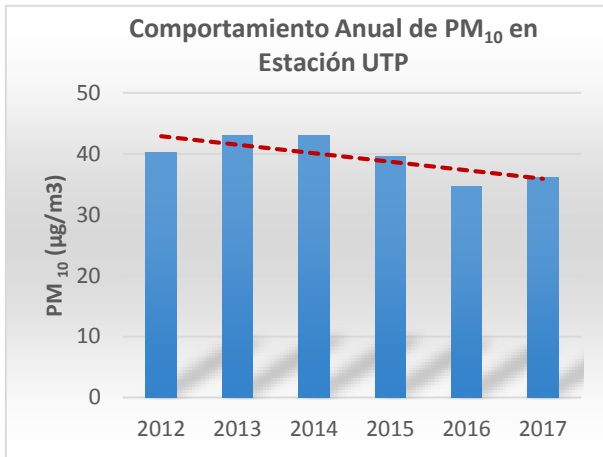
Gráfica 399 Comportamiento PM₁₀ en estación Ninfas Fuente: Elaboración propia

Con el análisis realizado se obtuvo la Gráfica 397, donde se puede observar el comportamiento de la concentración de las PM₁₀ en la estación de Agua Santa, presentó una tendencia de disminución de la concentración de este contaminante criterio, sin embargo, hubo un ligero aumento en el año 2014, esta disminución de partículas se puede deber a la implementación de nuevas estrategias para fuentes fijas establecidas en el



Gráfica 398 Comportamiento PM₁₀ en estación BINE Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, la concentración de este contaminante en la estación BINE (Gráfica 398) presenta una tendencia de crecimiento con el paso de los años, esta tendencia puede ser causada por un aumento del 12 % en el parque vehicular del municipio de Puebla durante el periodo 2012-2017, aunado a esto la creación de nuevas viviendas y del aumento poblacional dentro del municipio puede ser otro factor importante, por último,



Gráfica 400 Comportamiento PM₁₀ en estación UTP
Fuente: Elaboración propia

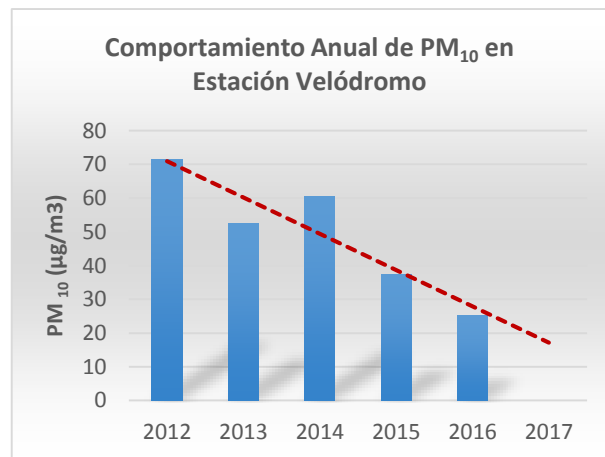
pero no menos importante la ceniza emitida por el volcán Popocatepetl es un factor relevante en el aumento de la concentración de partículas con diámetro aerodinámico menor o igual 10 micras.

Se observa para la estación de monitoreo atmosférico ubicada en las Ninfas (Gráfica 399), una tendencia creciente en la concentración de este contaminante criterio, a pesar de la faltante de datos para el año 2013, este se atribuye al aumento

en la construcción de viviendas, la actividad volcánica y las emisiones provenientes de autos, causando una generación mayor de PM₁₀.

Por otro lado, el comportamiento de la concentración de PM₁₀ de acuerdo con los datos obtenidos por la estación de monitoreo atmosférico ubicada en la UTP (Gráfica 400) presentan una tendencia decreciente, aunque se mantienen constante en los años 2013 y 2014, esto se puede deber a que en estos años se efectuaron diversas estrategias dentro del municipio de Puebla, tanto del Plan de Acción Climática Municipal y del Plan Municipal de Desarrollo 2014-2018.

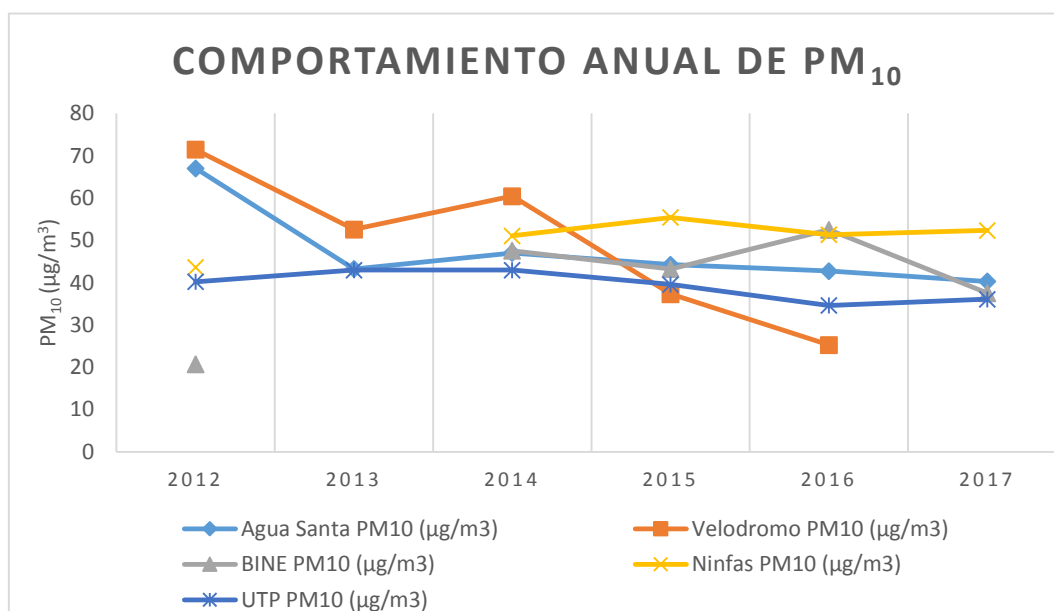
Finalmente, para la estación de monitoreo atmosférico ubicada en Velódromo (Gráfica 401), presenta una tendencia de disminución en la concentración de las PM₁₀, al no encontrarse esta estación en el municipio de Puebla se puede observar como los contaminantes no conocen límites fronterizos, debido a que no solo se quedan suspendidos en el área donde son emitidos, sino que son trasladados por el viento y pueden llegar a municipios aledaños, pero, no en la misma concentración.



Gráfica 401 Comportamiento PM₁₀ en estación Velódromo
Fuente: Elaboración propia

Con el análisis de datos anterior se puede concluir que la concentración de PM₁₀ ha variado respecto a los años y la estación en que fue monitoreado, esto además de las deficiencias de datos en la estación de monitoreo atmosférico. Sin embargo, a pesar de estas

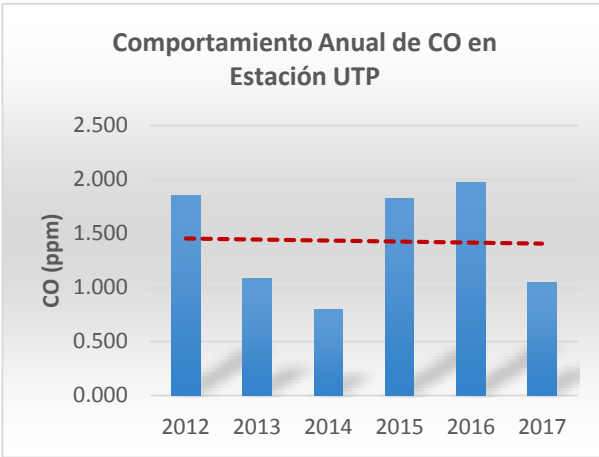
interferencias, se puede concluir que la concentración en mg/m^3 de PM_{10} tuvo un aumento para el 2014 y la tendencia que se presentó en la mayoría de las estaciones es una disminución con el paso de los años como se observa en la Gráfica 402. Esto es algo favorable y en gran medida debe ser consecuencia de algunos programas que se han implementado para disminuir la concentración de este contaminante ya que, en años anteriores era uno de los contaminantes con mayor concentración, sin embargo, es algo en lo que se debe seguir trabajando para lograr cumplir los límites máximos permisibles marcados por la norma, además, como se observó en la estación de velódromo la contaminación por PM_{10} no solo afecta al municipio de Puebla, sino a municipio aledaños por lo que se debe trabajar conjuntamente para el control de la concentración de este contaminante criterio.



Gráfica 402 Comportamiento Anual del PM_{10} en el periodo 2012-2017
Fuente: Elaboración propia

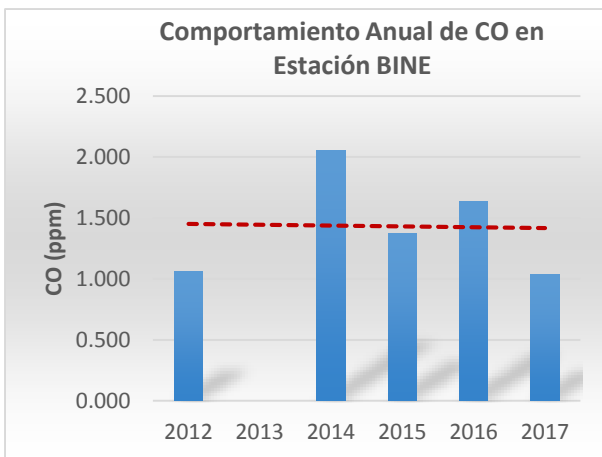
Comportamiento del CO en el Municipio de Puebla

El monóxido de carbono es un contaminante primario, que representa los 75 % de los contaminantes emitidos a la atmósfera y proviene en su gran mayoría del sector transporte (INECC, 2007). De igual forma la literatura reporta que la mayor concentración de CO se encuentra en la Zona Centro de la Ciudad de Puebla y esto se puede deber a la gran circulación de autos causantes de la combustión incompleta y a la actividad comercial de esta zona.



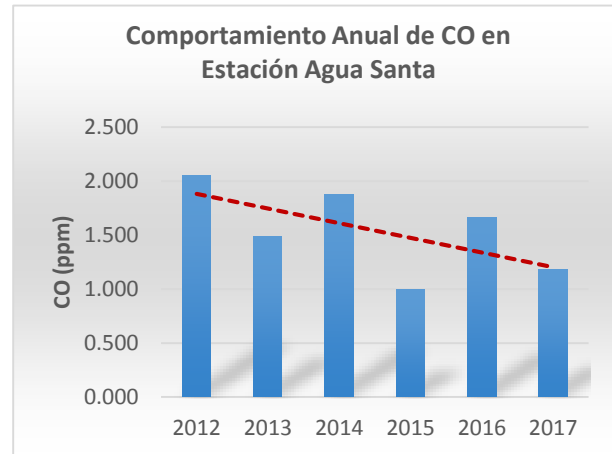
Gráfica 403 Comportamiento CO en estación UTP
Fuente: Elaboración propia

Por lo que se puede concluir que la tendencia de este contaminante es variable año con año. Sin embargo, en el año 2014 se presentó una disminución importante que puede deberse en gran medida a que en ese año el número de automóviles registrados en el municipio es menor en comparación a los demás años, registrando tan solo 554,314 automóviles, lo cual causó una menor emisión de monóxido de carbono por parte de los automóviles, además no debe de dejarse de tomar en cuenta que, en el último año 2017 del periodo



Gráfica 405 Comportamiento CO en estación BINE
Fuente: Elaboración propia

Por esta razón se realizó un análisis con el fin de conocer las tendencias de concentración de este contaminante criterio, obteniendo la Gráfica 403, que muestra el comportamiento de la concentración del monóxido de carbono monitoreado por la estación atmosférica ubicada en la UTP, se puede observar que a lo largo de este periodo de estudio se han tenido tanto incrementos como disminución en la concentración del CO.

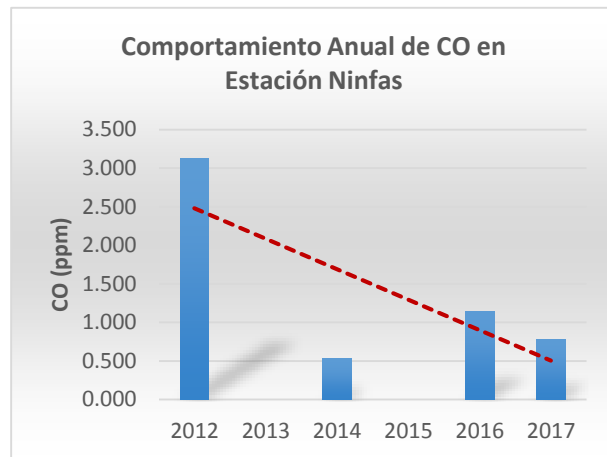


Gráfica 404 Comportamiento CO en estación Agua Santa
Fuente: Elaboración propia

analizado, se tuvo una disminución considerable del CO.

Mientras que la concentración de monóxido de carbono registrada por la estación de Monitoreo Atmosférico de Agua Santa (Gráfica 404) muestra un comportamiento contrario a la estación anterior, debido a que en el año 2014 se muestra un aumento del CO, sin embargo, la tendencia de la concentración de CO en

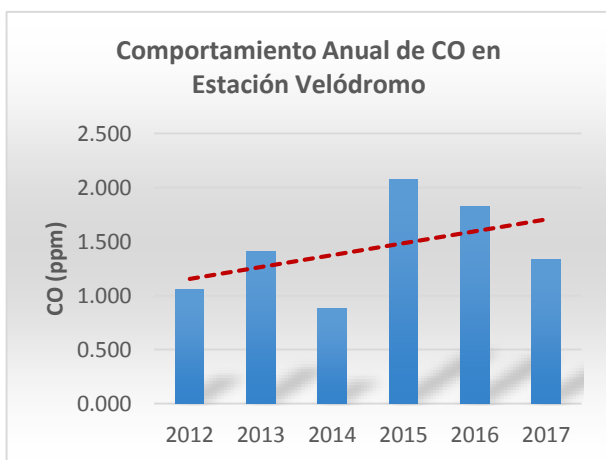
esta zona es decreciente, esto puede ser causada por diversos factores entre ellos se encuentra la implementación de estrategias enfocadas al transporte por parte del Programa de Gestión de la Calidad del Aire en el estado de Puebla como la implementación de la Red Urbana de Transporte Público así como las implementadas en el PACMUN como el Programa Vía recorre Puebla donde se promueve el uso transportes no motorizados, estas se enfocan en la disminución del tráfico y por ende las emisiones de CO emitidas por los medios de transporte.



Gráfica 406 Comportamiento CO en estación Ninfas
Fuente: Elaboración propia

Para la estación ubicada en BINE (Gráfica 405) se tiene una faltante de datos para el año 2013, a pesar de esto se puede determinar que la tendencia del CO en este lugar vario a lo largo de los años, sin embargo, cabe resaltar que en las estaciones anteriores aquí se presentó una disminución considerable en el año 2017, esto puede estar relacionado nuevamente a la implementación de estrategias contra la contaminación del aire mencionadas anteriormente.

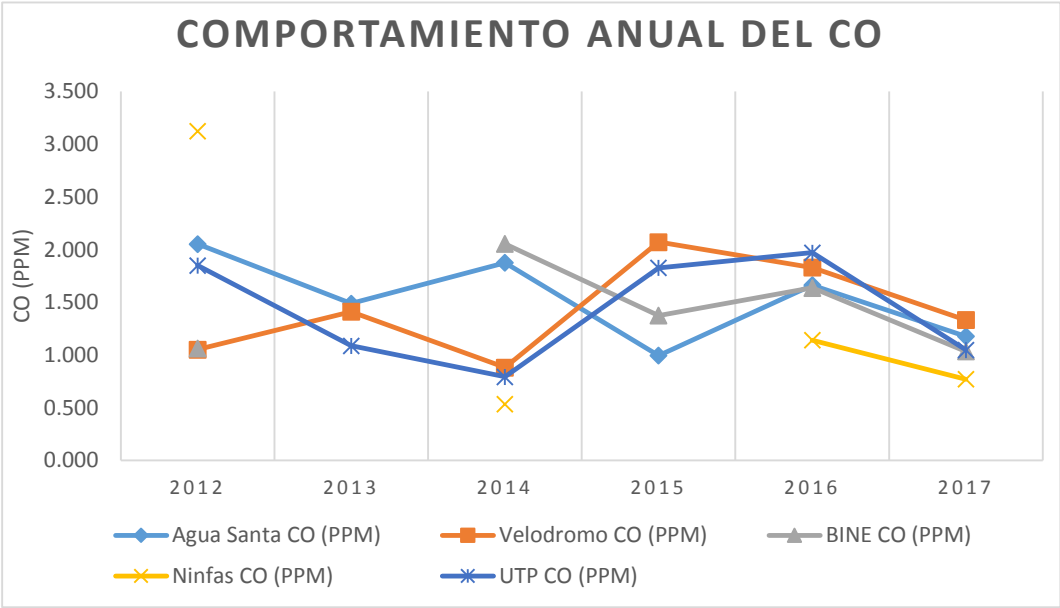
Por otro lado, para la Estación de Monitoreo Atmosférico ubicada en las Ninfas (Gráfica 406) al no reportar dos años este contaminante, se considera que no se tienen datos suficientes para conocer certeramente la tendencia de la concentración del monóxido de carbono, por lo menos para el periodo 2012-2017.



Gráfica 407 Comportamiento CO en estación Velódromo
Fuente: Elaboración propia

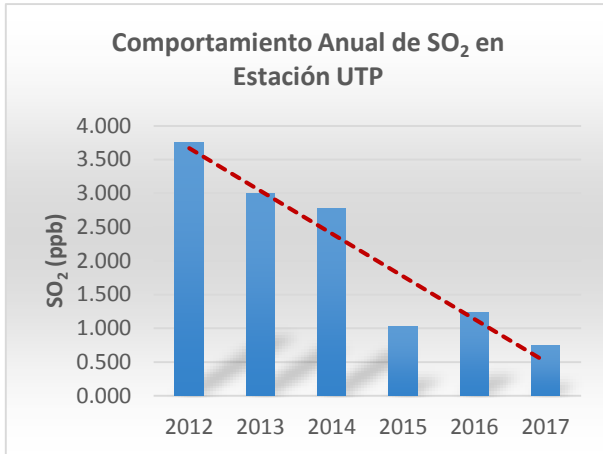
Finalmente, en la estación de monitoreo atmosférico de Velódromo (Gráfica 407) se encuentra una tendencia de la concentración de CO es creciente al paso de los años, a diferencia de las estaciones anteriores, esto puede deberse principalmente a que, al no encontrarse esta estación dentro del municipio de Puebla como las demás estaciones, sin

embargo, en el año 2017 si presenta una disminución de la concentración de este contaminante como en las demás estaciones de monitoreo atmosférico. Por lo anterior se puede concluir que este contaminante varía de acuerdo la estación de monitoreo y al año en que sea analizado, sin embargo, en todas las estaciones se observa que para el año 2017 se tuvo una disminución considerable de la concentración del monóxido de carbono como se observa en la Gráfica 408, esto se puede deber a la implantación de estrategias para el control de emisiones de los medios de transporte, a pesar de la existencia de estas estrategias, debe considerarse la implementación de nuevos proyectos para el control de la circulación de los automóviles dentro del municipio de Puebla, además se debería considerar implementar un programa para la mejora de las estaciones de monitoreo atmosférico, pertenecientes a la REMA esto debido a la faltante de datos que se presentan durante el periodo de interés.



Gráfica 408 Comportamiento Anual del CO en el periodo 2012-2017
Fuente: Elaboración propia

Comportamiento del SO₂ en el Municipio de Puebla

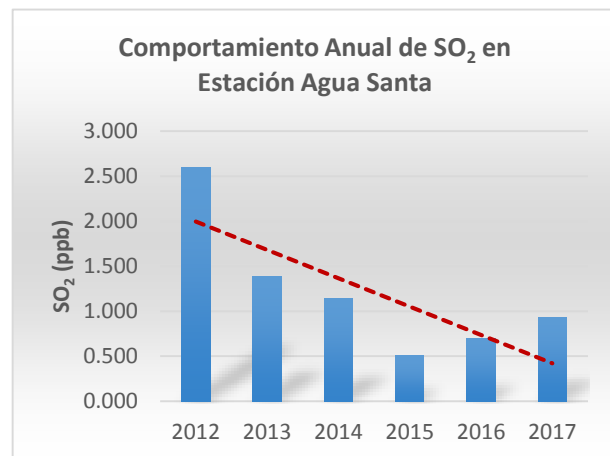


Gráfica 409 Comportamiento SO₂ en estación UTP
Fuente: Elaboración propia

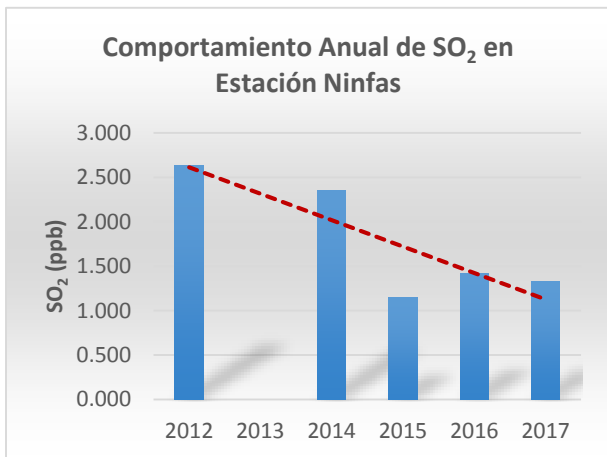
Para el contaminante dióxido de azufre se realizó un análisis de la tendencia que tiene su concentración en el municipio de Puebla, a pesar de que en estudios anteriores se ha reportado que la concentración de SO₂ en esta misma zona siempre se encuentran muy por debajo de lo establecido en la NOM-022-SSA1-1993, sin embargo, a exposiciones moderadas el gas puede ser sofocante mientras que a mayores concentraciones

de 20 ppm los efectos pueden ser graves. Durante una exposición corta de 10 min se pueden presentar síntomas de respiratorios asmáticos (ProAire, 2012), aunado a esto que el tener una baja concentración de SO₂ nos permite reducir la probabilidad de lluvia ácida ya que, este contaminante junto con el NO₂ son de los principales precursores de esta.

Con el análisis realizado para el contaminante SO₂ se obtuvo la Gráfica 409 de acuerdo con los datos obtenidos en la estación de monitoreo atmosférico ubicada en la UTP, en este gráfico se puede observar que la tendencia de la concentración del SO₂ es decreciente con el paso de los años, sobre todo en los años 2015 y 2017, este comportamiento se puede deber a diversos factores entre ellos se encuentran la implementación de estrategias de control en las emisiones fijas por parte del plan de desarrollo municipal 2011-2014 dentro de las cuales se encuentra el controlar las fuentes fijas de competencia municipal y realizar un plan de regulación de la Licencia de Funcionamiento así como el inventario anual de fuentes fijas, lo que repercute en la concentración del dióxido de azufre debido a que este es emitido en un 70 % por fuentes puntuales principalmente las industrias (Montero, 2011), aunado a



Gráfica 410 Comportamiento SO₂ en estación Agua Santa
Fuente: Elaboración propia

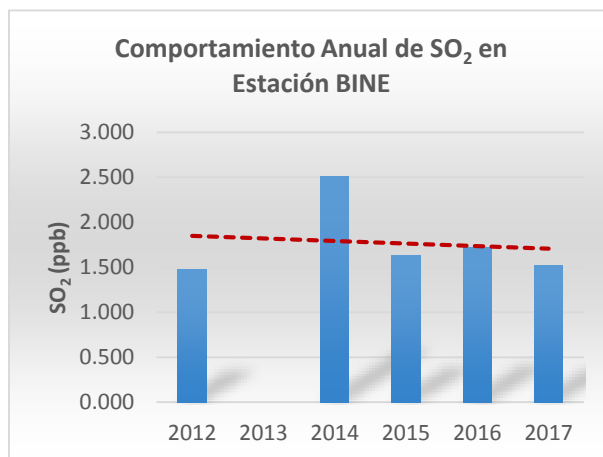


Gráfica 411 Comportamiento SO₂ en estación Ninfas
Fuente: Elaboración propia

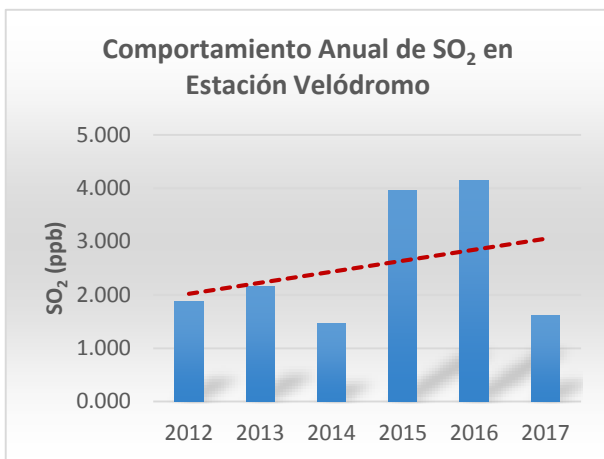
esto, este comportamiento se puede deber que en los últimos años en el municipio ha disminuido el establecimiento de nuevas industrias, sin embargo, no se debe descartar que la falta de datos consecutivos puede causar conclusiones erróneas en el análisis del comportamiento de la concentración. De igual forma en las estaciones de Agua Santa (Gráfica 410) y Ninfas (Gráfica 411) observa un comportamiento muy similar al de la

estación de monitoreo anterior donde la concentración de SO₂ tienen una tendencia decreciente sobre todo en los años 2015 y 2016, por lo que esta tendencia puede ser causada por las estaciones expuestas anteriormente.

Mientras que en la Gráfica 412 se observa el comportamiento de SO₂ en la estación BINE con una tendencia variable de la concentración de este contaminante a lo largo de los años, esto puede ser causado principalmente por la faltante de datos reportados por la estación de monitoreo, sin embargo, al presentar una disminución en los últimos años y un promedio de 1.769 ppb, se puede determinar que el comportamiento de este contaminante posiblemente fue afectado por la implementación de estrategias en el cumplimiento de la NOM-085-SEMARNAT-1994 por parte del plan de desarrollo municipal 2011-2014. Finalmente, los datos para la concentración de SO₂ reportados por la estación de monitoreo atmosférico ubicada en Velódromo (Gráfica 413) nos muestra un comportamiento contrario a las estaciones previamente analizadas, aquí el comportamiento de la concentración de este contaminante presenta un aumento año con año sobre todo en los años donde las demás estaciones de monitoreo reportaban concentraciones menores, esta estación no se encuentra ubicada en el municipio de Puebla, además es importante recordar que de acuerdo con algunos autores, este contaminante tiene la



Gráfica 412 Comportamiento SO₂ en estación Ninfas
Fuente: Elaboración propia

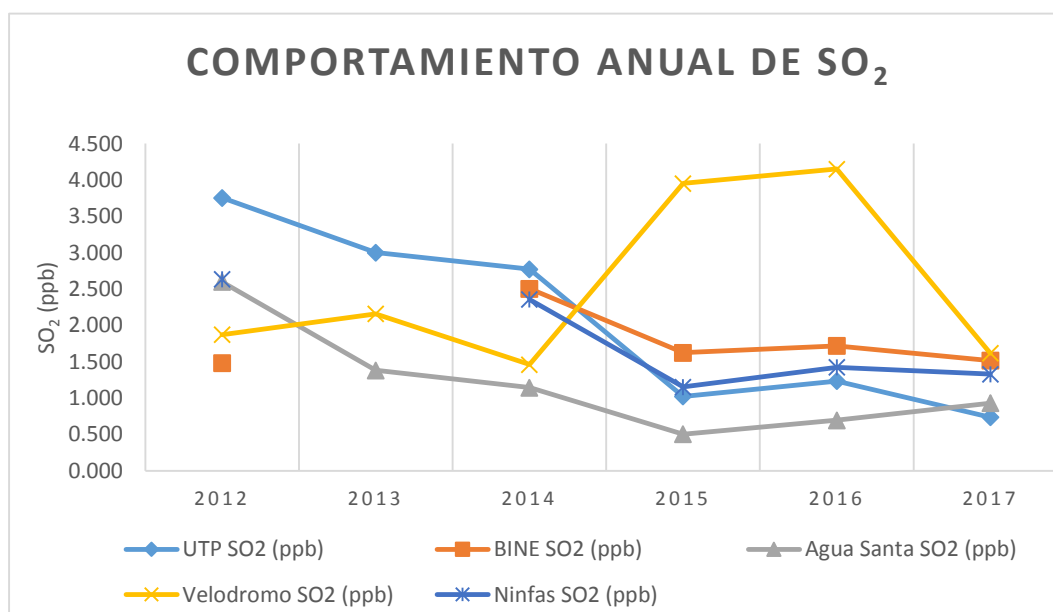


Gráfica 413 Comportamiento SO₂ en estación Velódromo Fuente: Elaboración propia

facilidad de transportarse a varios kilómetros de donde es emitido (Traviño, 2000) (García, 2010), por lo que al no encontrarse esta estación en la zona de estudio como las demás, puede que detecte más altas concentraciones debido a que dióxido de azufre emitido en el municipio de Puebla puede ser transportado varios kilómetros. En conclusión, (Gráfica 414) este contaminante de acuerdo con estudios

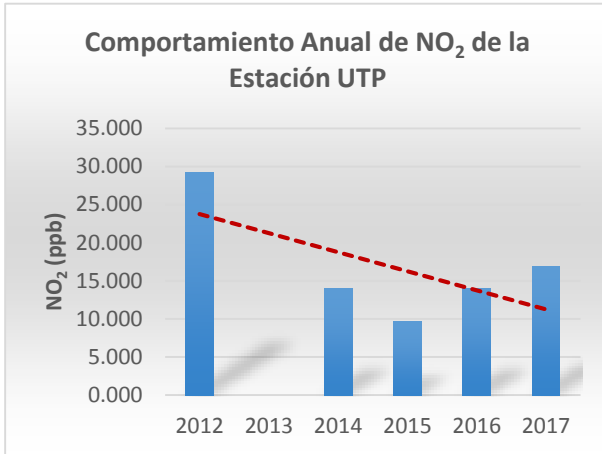
realizados anteriormente y de acuerdo con este análisis, siempre presenta una disminución en su concentración dentro

del Municipio de Puebla, lo cual puede deberse a la disminución de establecimiento de nuevas empresas dentro del municipio así como estrategias implementadas por parte del ayuntamiento, sin embargo, es importante seguir creando e implementando nuevas estrategias así como mejorando las ya existentes con la finalidad de seguir teniendo un buen control de la concentración del dióxido de azufre, debido a que de acuerdo con lo observado en la estación de monitoreo Velódromo las emisiones de SO₂ pueden no solo afectar al municipio sino también a municipio o comunidades aledañas.



Gráfica 414 Comportamiento Anual del SO₂ en el periodo 2012-2017 Fuente: Elaboración propia

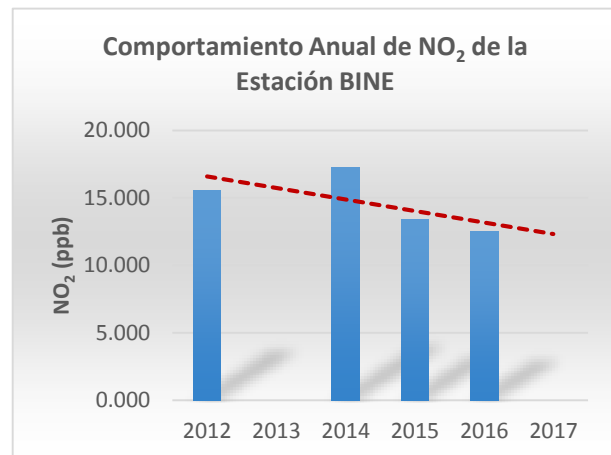
Comportamiento del NO₂ en el Municipio de Puebla



Gráfica 415 Comportamiento NO₂ en estación UTP
Fuente: Elaboración propia

Para conocer la tendencia que tiene la concentración de dióxido de nitrógeno se realizó este análisis en las diferentes estaciones de monitoreo dentro del Municipio de Puebla, aun cuando en estudios anteriores para el municipio de Puebla siempre está disminuyendo su concentración año con año, este compuesto es un contaminante primario proveniente de emisiones de procesos de combustión, principalmente vehículos,

además que es emitido por la generación de energía eléctrica. Para el caso del comportamiento presentado en la estación de UTP (Gráfica 415), a pesar de los datos faltantes para el año 2013, se puede determinar que la tendencia es decreciente, debido a diversos factores entre ellos se encuentra la implementación de diversas estrategias para el control de emisiones vehiculares por parte del municipio como es el caso de la estrategia de acreditación de unidades de verificación vehicular, estrategia de promoción de vehículos no motorizados y de la estrategia de estudio de mejora en la movilidad del transporte público, pertenecientes al Plan de Acción de Climática Municipal, además del proyecto Waste to Energy el que tiene como objetivo generar energía a partir de los residuos sólidos urbanos del municipio. Mientras que para la estación de BINE (Gráfica 416) presenta una tendencia decreciente al igual que la estación anterior, este comportamiento se puede deber de igual forma a la implementación de estrategias para el control de contaminación del aire, sin embargo, es importante mencionar que la faltante de datos puede causar una falsa tendencia para el comportamiento de la concentración del dióxido de Nitrógeno.



Gráfica 416 Comportamiento NO₂ en estación BINE
Fuente: Elaboración propia

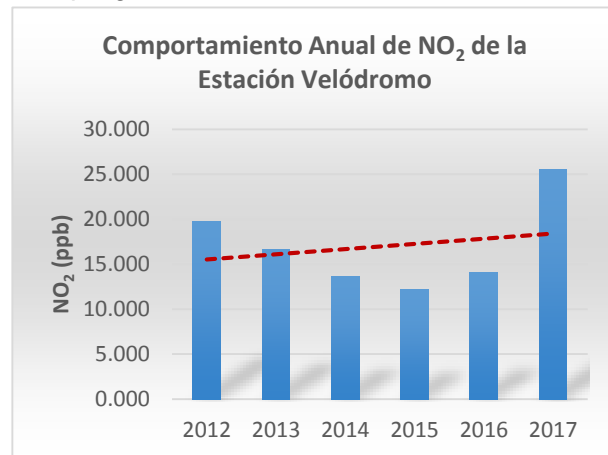


Gráfica 417 Comportamiento NO₂ en estación Agua Santa Fuente: Elaboración propia

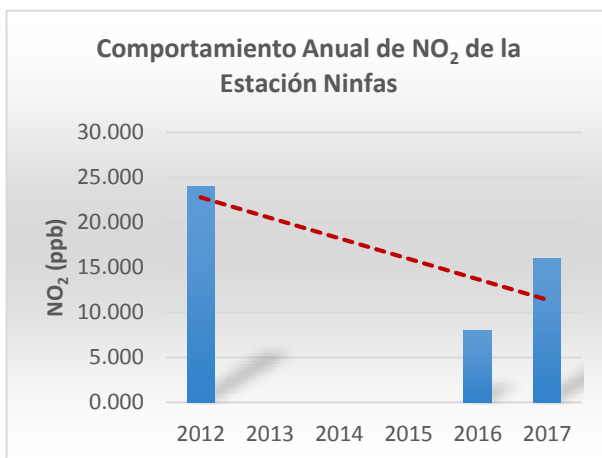
Mientras que para las estaciones de monitoreo de Agua Santa (Gráfica 417) y Velódromo (Gráfica 418), presentaron un comportamiento contrario a las estaciones anteriores, es decir, la concentración del NO₂ tiene una tendencia creciente, sobre todo en el año de 2017, esto puede deberse principalmente al crecimiento del parque vehicular en los últimos años dentro del Municipio de Puebla, debido a que en los últimos años este ha crecido un

12 % del total de autos registrados para el año 2012, sin embargo, este comportamiento de igual forma se puede deber a la falta de un programa de control de la circulación de automóviles dentro del municipio.

Finalmente, para la estación de Ninfas (Gráfica 419) no se puede determinar una tendencia de la concentración de este contaminante debido a la faltante de datos reportados. En conclusión, el comportamiento de la concentración del Dióxido de Nitrógeno (Gráfica 420) es variable, debido de que algunas estaciones muestran tendencias

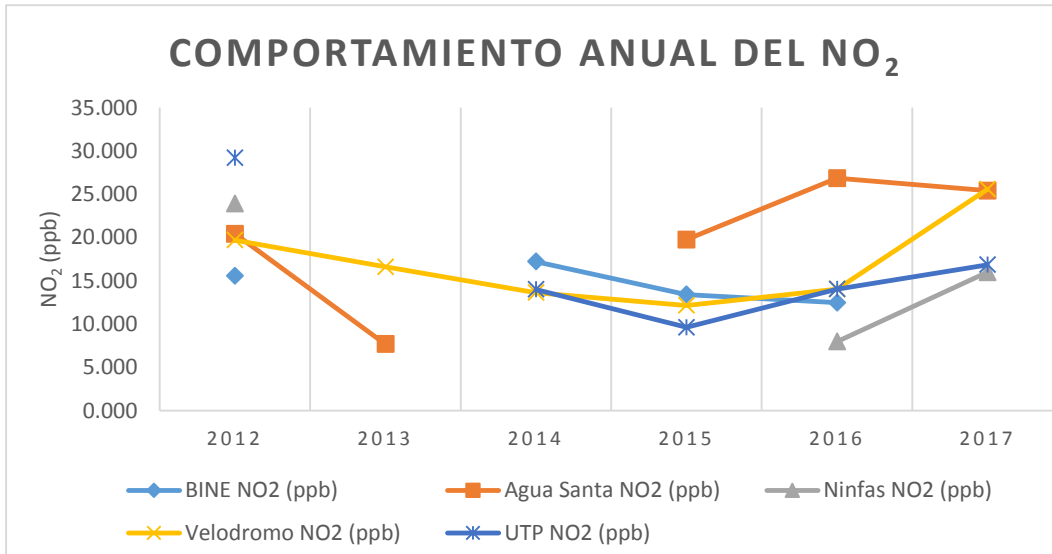


Gráfica 418 Comportamiento NO₂ en estación Velódromo Fuente: Elaboración propia



Gráfica 419 Comportamiento NO₂ en estación Ninfas Fuente: Elaboración propia

crecientes y otras tendencias decrecientes, por esto es importante la implementación y seguimiento de estrategias para el control de emisiones producidas por automóviles y generación de energía, además de la mejora de las estaciones de monitoreo atmosférico, para evitar la falta de datos y con esto tener una mayor certeza de las tendencias del SO₂ dentro del Municipio de Puebla.



*Gráfica 420 Comportamiento Anual del NO₂ en el periodo 2012-2017
Fuente: Elaboración propia*

Cumplimiento de la normatividad de la Secretaría de Salud

Por otro lado, se consideró importante conocer si las concentraciones de los contaminantes criterio emitidos en el municipio de Puebla, se encuentran dentro de los límites máximos permisibles establecidos por la normatividad de la Secretaría de Salud, al mismo tiempo con este análisis se puede determinar si la población del municipio está expuesta a una apropiada calidad el aire.

Para conocer, el cumplimiento de la normatividad a continuación se muestra en la Tabla 7 los años y las estaciones de monitoreo atmosférico que cumplen un 75 % o más de datos válidos para la concentración de los contaminantes NO₂, O₃, CO, SO₂ y para las cuales se hará un análisis del cumplimiento de la norma correspondiente, para el caso de las PM₁₀ y PM_{2.5} se realizaron otros porcentajes diferentes a estos, de acuerdo con lo que establece la NOM-025-SSA1-2014.

Tabla 4 Criterio de suficiencia anual en cada estación de monitoreo atmosférico periodo 2012-2017
Fuente: Elaboración propia

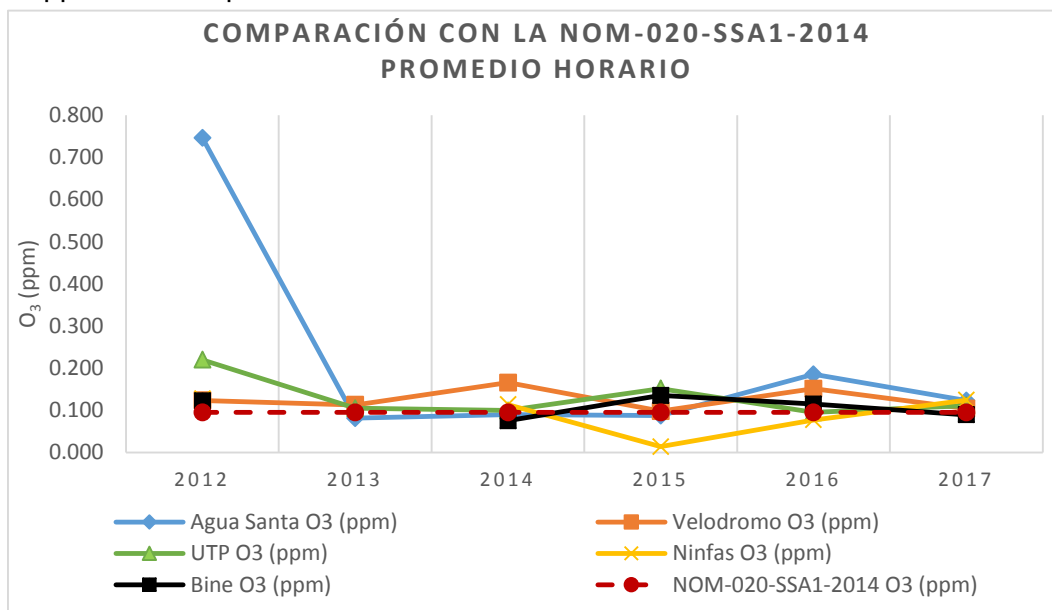
NO ₂					
Año	UTP	Ninfas	BINE	Agua Santa	Velódromo
2012	93%	100%	90%	94%	
2013					98%
2014			88%		96%
2015			86%	79%	
2016	99%				
2017	99%	76%			96%
O ₃					
Año	UTP	Ninfas	BINE	Agua Santa	Velódromo
2012	98%	93%	96%	92%	
2013	99%				91%
2014	76%		85%	79%	96%
2015	78%	78%	91%	100%	76%
2016	100%	98%	75%	84%	95%
2017	97%	79%	94%	56%	90%
CO					
Año	UTP	Ninfas	BINE	Agua Santa	Velódromo
2012	96%	94%	96%	95%	
2013	97%				97%
2014	81%		88%	75%	95%
2015	77%		100%		91%
2016	100%	97%	75%	88%	95%
2017	86%				
SO ₂					
Año	UTP	Ninfas	BINE	Agua Santa	Velódromo

2012	96%	98%	95%	92%	
2013	94%				
2014					96%
2015		76%		100%	93%
2016	100%	99%		78%	
2017	94%	78%			87%

Cumplimiento de la NOM-020-SSA1-2014

Para el caso del ozono la norma por parte de la Secretaría de la Salud que establece los límites máximos permisibles de concentración de este contaminante en el medio ambiente para la protección de la salud humana, es la NOM-020-SSA1- 2014, esta norma es de obediencia obligatoria en todo el territorio mexicano.

De acuerdo con dicha norma cada una de las concentraciones horarias debe ser menor o igual que 0.095 ppm como promedio horario el cual no puede ser rebasado ninguna vez en el año para cumplir la norma. Sin embargo, en caso de que se tenga menos del 75 % de los registros en el periodo y al menos una de las concentraciones horarias sea mayor que 0.095 ppm se incumple la norma.

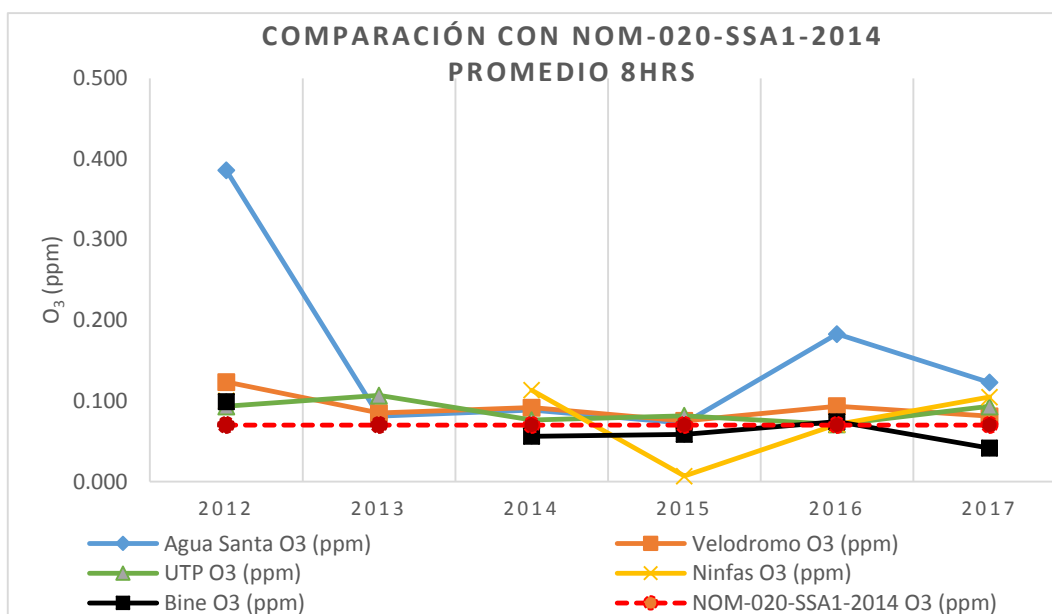


Gráfica 421 Comparación de la NOM-020--SSA1-2014 en promedio horario
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la REMA

Como se observa en la Gráfica 421, la concentración horaria de ozono se encuentra por encima del límite permisible establecido por la norma en la mayoría de las estaciones a lo largo del periodo de análisis, de igual forma se puede observar que la estación donde se presentaron menores concentraciones es Agua Santa, mientras que la estación de monitoreo con las mayores concentraciones es la de Velódromo; la concentración horaria

de ozono disminuyo en el último año del periodo analizado, acercándose un poco más al límite máximo permisible.

Por otro lado, de acuerdo con la NOM-020-SSA1-2014 la concentración de ozono en un promedio de ocho horas debe ser menor o igual a 0.070 ppm, el cual puede solo ser rebasado una vez al año cuando se cuenta con el 75 % de los datos de concentración de ozono, mientras que cuando no se cuente con este criterio de suficiencia solo se incumple la norma cuando al menos una de las concentraciones de los promedios móviles de 8 horas sea mayor que 0.070 ppm, esto con la finalidad de asegurar una buena calidad del aire y proteger la salud humana.



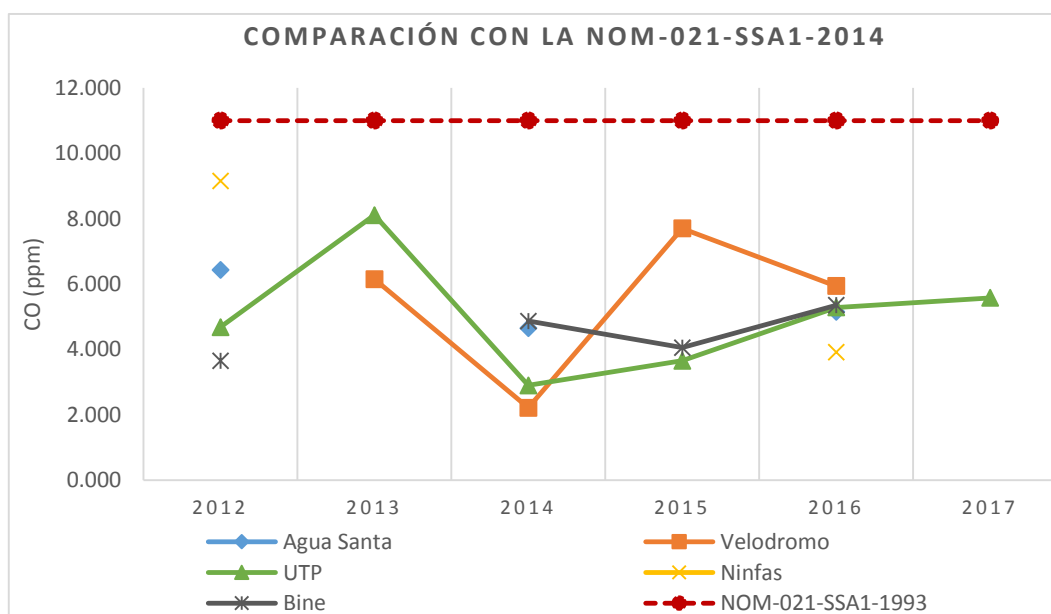
Gráfica 422 Comparación de la NOM-020-SSA1-2014 en promedio de 8 horas
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la REMA

Para conocer que estaciones cumplían o no con al menos el 75% de los datos se consideró la Tabla 7, por lo que en la Gráfica 422 se puede observar la comparación que se realizó entre límite establecido por la norma para el promedio de 8 horas y las concentraciones de ozono a lo largo del periodo 2012-2017, las cuales se encuentran fuera del límite establecido. La estación que en su mayoría cumple con la norma es la estación BINE, mientras que la estación que se encuentra con mayor concentración de ozono en promedios de ocho horas es la estación Agua Santa, además se puede observar que en el último año del periodo de estudio en todas las estaciones disminuye la concentración de ozono en periodos de 8 horas.

Este contaminante criterio es uno de los que más datos válidos reportaron las cinco estaciones de monitoreo a largo del periodo 2012-2017, debido a que la concentración de este contaminante se encuentra por encima de lo establecido por la norma es importante implementar programas para el control de la concentración de este contaminante sobre todo porque en años anteriores este era uno de los contaminantes que más afectaba y rebasaba los límites de la norma en el Municipio de Puebla.

Cumplimiento de la NOM-021-SSA1-1993

De igual forma que el contaminante anterior la Secretaría de Salud establece el límite máximo permisible para el monóxido de carbono en la NOM-021-SSA1-1993 de 11 ppm en promedio móvil de ocho horas una vez al año, esta norma es de obediencia obligatoria en todo el territorio mexicano, por otro lado, el objetivo de esta norma es establecer un límite de concentración el cual debe no debe ser rebasado más de una vez al año para protección a la salud de la población.



Gráfica 423 Comparación de la NOM-021-SSA1-2014
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la REMA

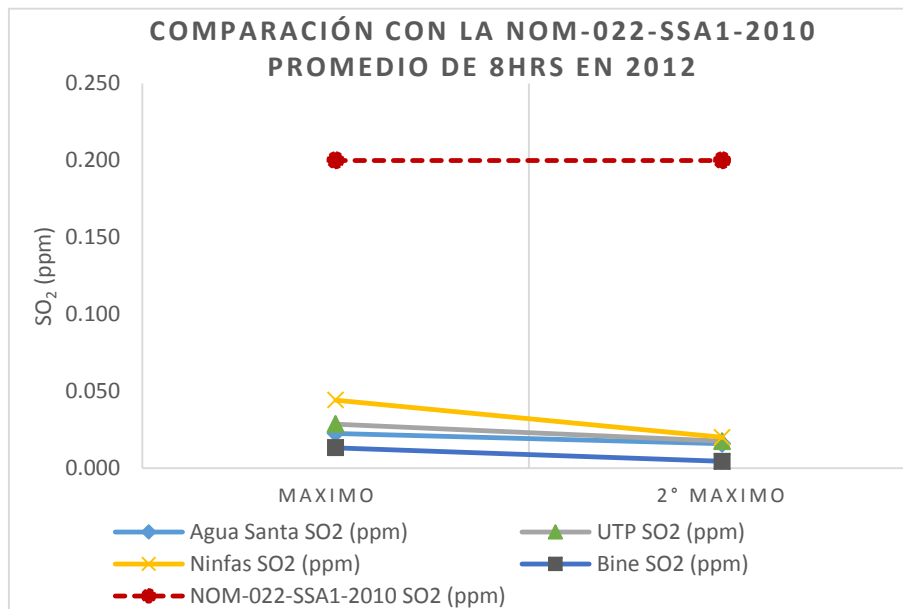
Para la comparación de la concentración de este contaminante con el límite establecido por la Secretaría de Salud solo se consideraron las estaciones que cumplieran con el 75 % de datos válidos de concentración de CO requeridos para establecer un criterio de cumplimiento de acuerdo con lo establecido en la Tabla 7 (Gráfica 423). Las concentraciones de monóxido de carbono se encuentran por abajo del límite máximo permisible establecido por dicha norma.

Deben ser implementados programas para la mejora de la calidad del aire en el municipio de Puebla con la finalidad de seguir cumpliendo los límites establecidos por la NOM-021-SSA1-1993 y de ser posible disminuir las concentraciones de monóxido de carbono, de igual forma se debe considerar la implementación de programas para el mantenimiento de las estaciones de monitoreo, con la finalidad de asegurar que están registren un mayor número de datos válidos.

Cumplimiento de la NOM-022-SSA1-2010

El dióxido de azufre es un contaminante criterio, por lo que la Secretaría de Salud estableció la NOM-022-SSA1-2010 la cual tiene por objetivo establecer los límites máximos permisibles de concentración de dióxido de carbono en el aire ambiente con la finalidad de proteger la salud humana del territorio mexicano, esta norma es de obediencia obligatoria en todo el territorio.

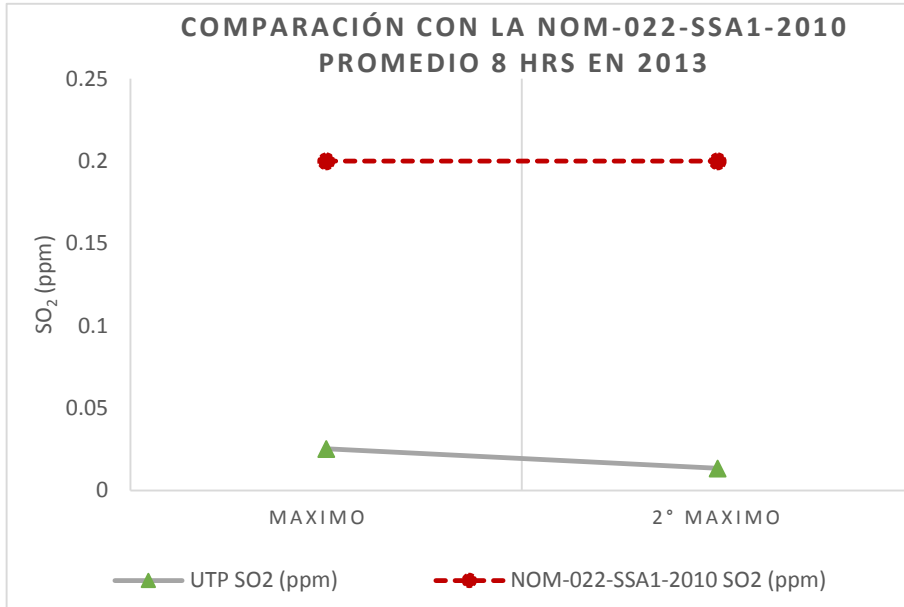
De acuerdo con esta norma el límite permisible para la concentración del SO₂ es de 0.200



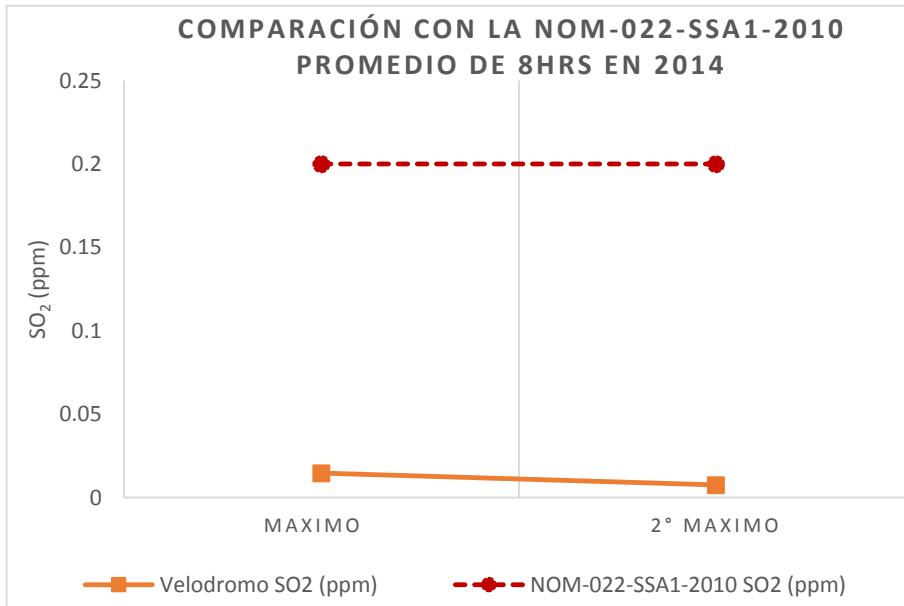
ppm en un promedio de 8 horas y no debe ser rebasados más de dos veces al año, al igual que en los contaminantes analizados anteriormente se requería de un criterio de 75 % de datos válidos anuales para conocer si se cumple con esta norma.

Gráfica 424 Comparación de la NOM-022-SSA1-2010 promedio 8hrs en 2012
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la REMA

Para el año 2012 (Gráfica 424), se puede observar que tanto el máximo como el segundo máximo de concentración de dióxido de azufre en este año se encuentran muy por debajo del límite establecido por la norma, debido al criterio de suficiencia se tomaron en cuenta todas las estaciones a excepción de la estación de Velódromo.



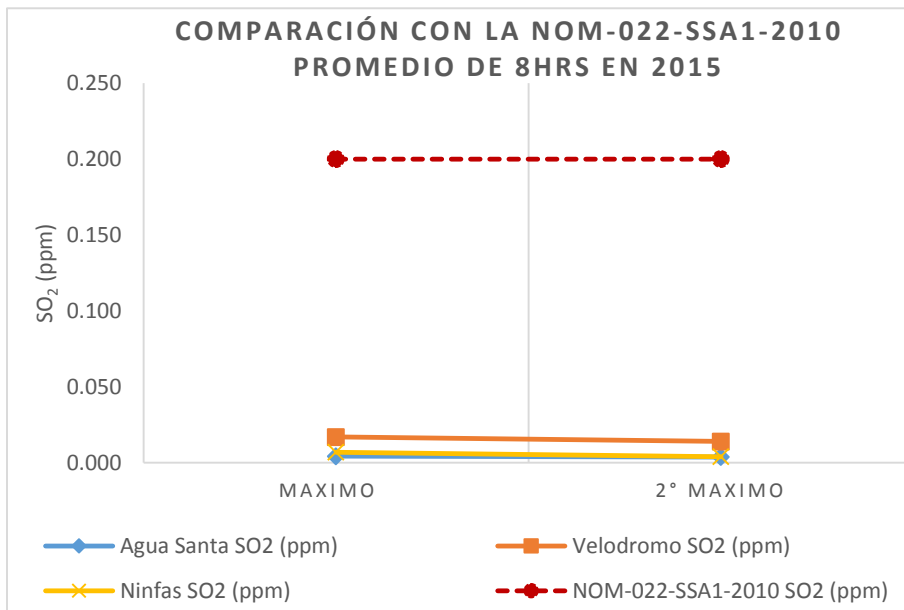
Gráfica 425 Comparación de la NOM-022-SSA1-2010 promedio 8hrs en 2013
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la REMA



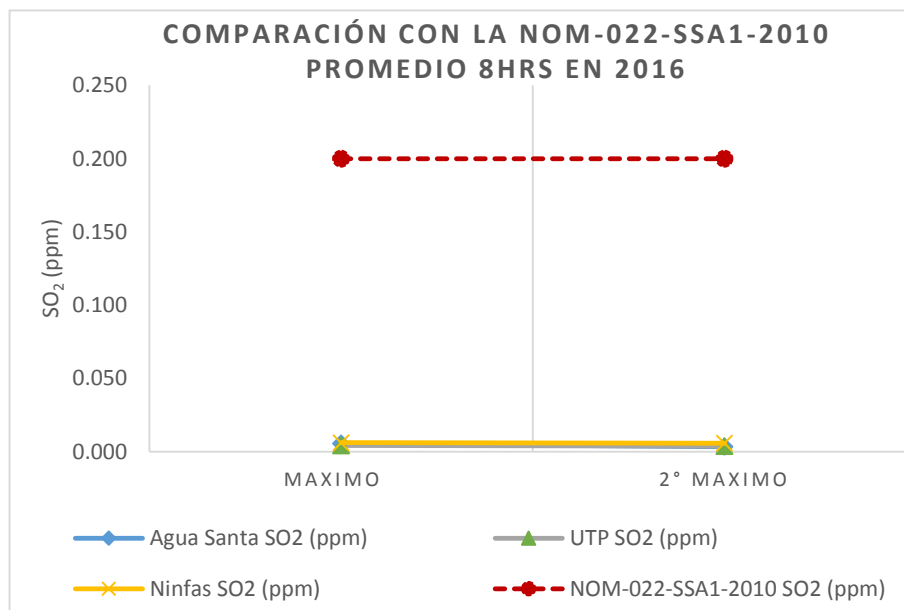
Gráfica 426 Comparación de la NOM-022-SSA1-2010 promedio 8hrs en 2014
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la REMA

Por otro lado, para los años 2013 y 2014 se presentó una gran deficiencia de concentraciones válidas reportadas por las estaciones por lo que solo se consideró la estación UTP para el año 2013, mientras que para el 2014 se consideró la estación Velódromo, como se muestran en las Gráficas 425 y Gráfica 426 respectivamente, al igual

que en el año anterior el máximo y el segundo máximo de concentración de dióxido de azufre se encuentran muy por debajo del límite establecido por la norma.

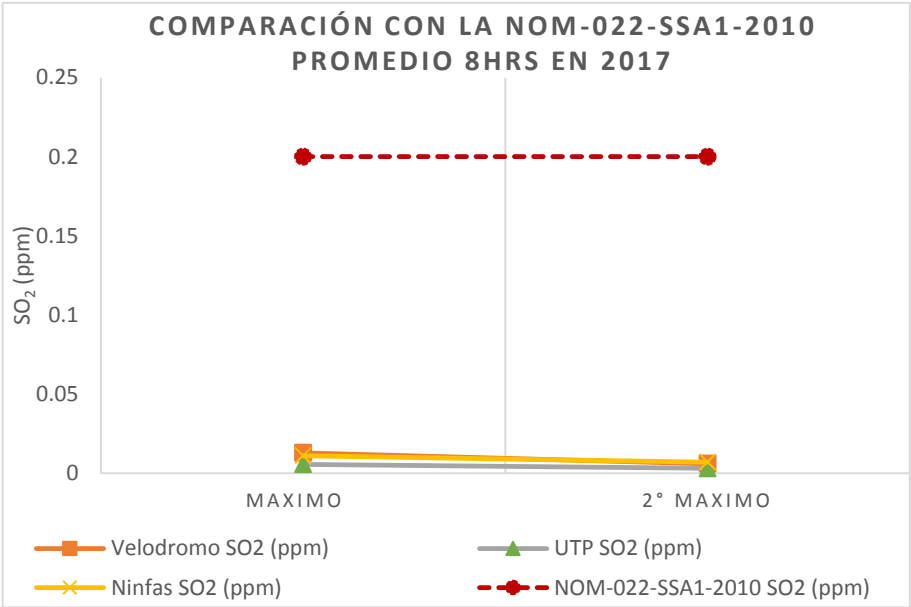


Gráfica 427 Comparación de la NOM-022-SSA1-2010 promedio 8hrs en 2015
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la REMA



Gráfica 428 Comparación de la NOM-022-SSA1-2010 promedio 8hrs en 2016
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la REMA

Para el año 2015 (Gráfica 427) la concentración de SO₂ se encuentra por debajo de los 0.200 ppm que establece la norma como límite permisible de ocho horas, para este año solo se consideraron las estaciones Agua Santa, Velódromo y Ninfas debido a que son las únicas que cumplen el criterio de 75 % de datos válidos, de igual forma para el año 2016 (Gráfica 428) solo se consideraron las estaciones UTP, Ninfas y Agua Santa debido nuevamente por el criterio de suficiencia, en este año de igual forma tanto el máximo como el segundo máximo de concentración de dióxido de azufre se encuentra muy por debajo del límite establecido por la NOM-022-SSA1-2010.



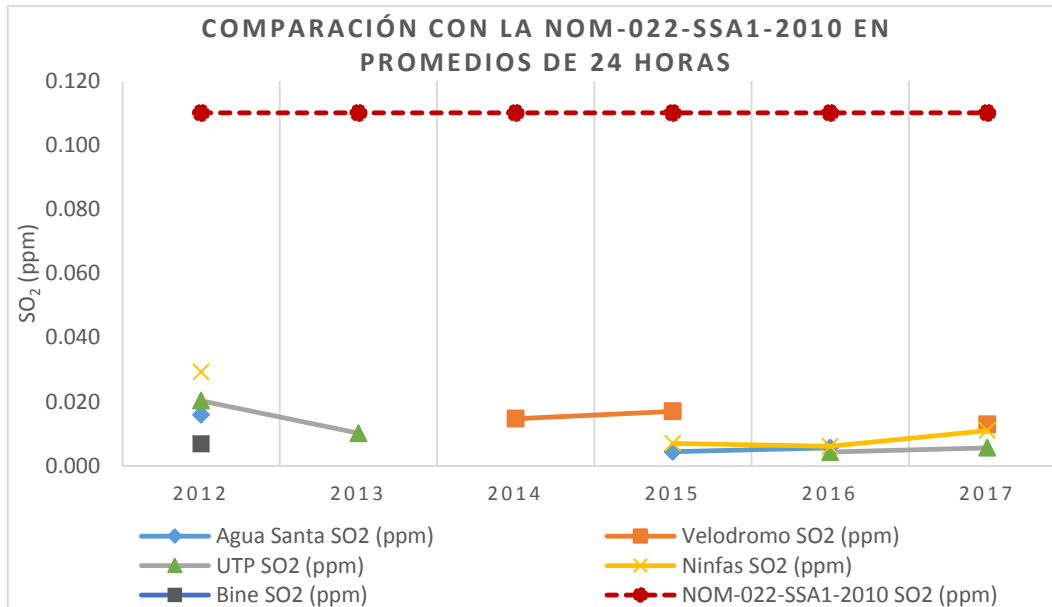
Gráfica 429 Comparación de la NOM-022-SSA1-2010 promedio 8hrs en 2017
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la REMA

Finalmente, para el año 2017 (Gráfica 429) se presentó la misma tendencia de concentración de SO₂ que en los años anteriores, para este año se consideraron las estaciones UTP, Ninfas y Velódromo. Por ello, se deben implementar estrategias para el cuidado de la calidad de aire, además, de considerar la implementación de un programa de mantenimiento y seguimiento para las estaciones de monitoreo atmosférico que pertenecen a la REMA, debido a la deficiencia de datos presentes para este contaminante.

Así mismo la NOM-022-SSA1-2010 establece un límite máximo permisible para un promedio de 24 horas de 0.110 ppm de dióxido de azufre, el cual solo puede ser alcanzado una vez al año con el objetivo de cuidar la salud de la población mexicana.

De igual forma que en el caso anterior, para la comparación de concentración de SO₂ en promedios de 24 horas se consideraron las estaciones que cumplían con el 75 % de datos de acuerdo con la Tabla 7 mostrada anteriormente. Como se observa en la Gráfica 430, la

concentración de SO₂ se encuentra por debajo del límite establecido por la norma en las diferentes estaciones a lo largo del periodo 2012-2017, cabe mencionar que se presentó una gran deficiencia de datos de concentraciones válidos sobre todo en los años 2013 y 2014.

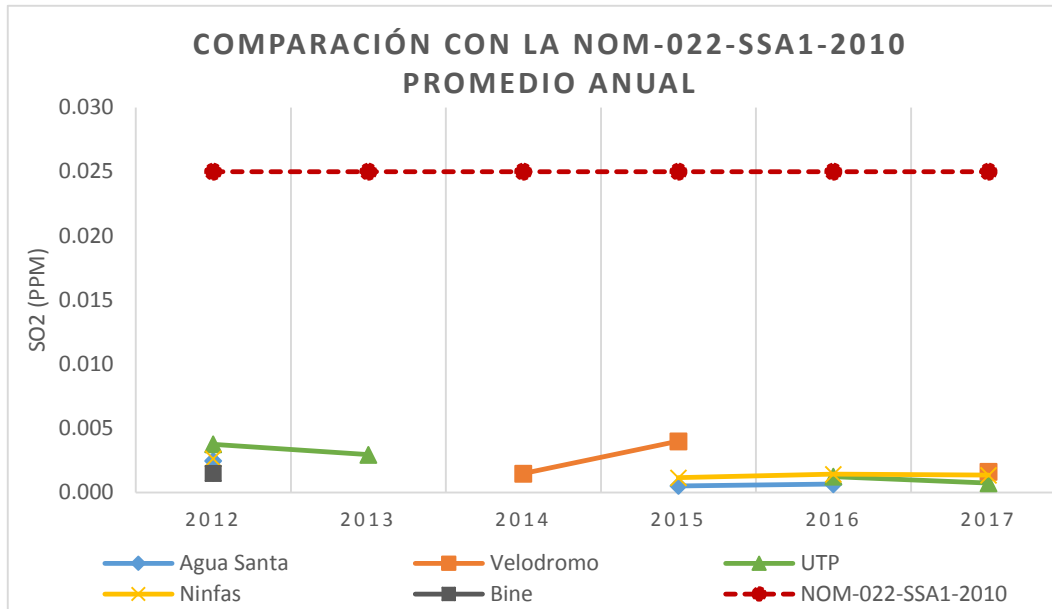


Gráfica 430 Comparación de la NOM-022-SSA1-2010 promedio de 24 hrs

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la REMA

De igual forma, la NOM-022-SSA1-2010 establece un límite máximo permisible anual para el dióxido de azufre de 0.025 ppm, como se observa en la Gráfica 431 la concentración de dióxido de azufre a lo largo del periodo analizado 2012-2017 se encuentra por debajo del límite permisible anual. Sin embargo, no todos los años se consideraron para todas las estaciones debido a que no cumplían con el criterio de suficiencia anual de datos válidos.

A pesar de que la concentración de este contaminante criterio se encuentra muy por debajo de los límites permisibles en los diferentes promedios anuales, horarios y de ocho horas, no deben dejarse de implementar programas y estrategias para el control de la concentración de este contaminante, además por la falta de datos válidos se deben implementar programas de monitoreo y mantenimiento para las estaciones de monitoreo atmosférico pertenecientes a la Red de Monitoreo Atmosférico Estatal.



Gráfica 431 Comparación de la NOM-022-SSA1-2010 promedio anual
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la REMA

Cumplimiento de la NOM-023-SSA1-1993

Para el caso del dióxido de nitrógeno, la norma que establece el límite máximo permisible de concentración de este contaminante criterio es la NOM-023-SSA1-1993, esta norma al igual que las anteriores son de obediencia obligatoria en el territorio mexicano, la cual busca la protección a la salud de la población del territorio mexicano al exponerse al aire ambiente. De acuerdo con dicha norma no se debe rebasar el promedio horario de 0.21 ppm, más de una vez al año.

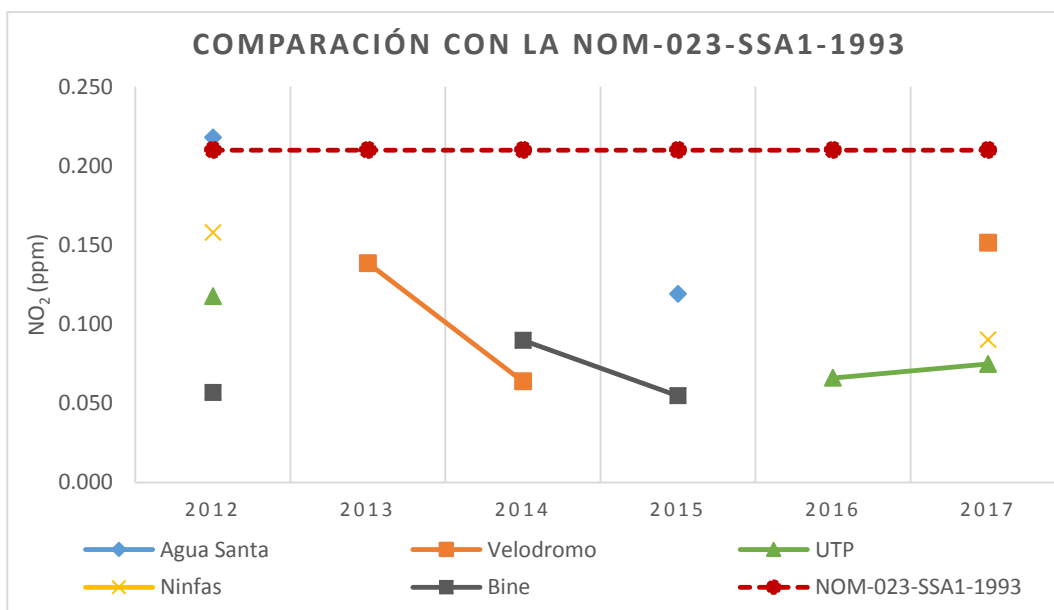
Para el caso del año 2012 se tomaron en cuenta todas las estaciones de monitoreo excepto la estación Velódromo, debido a que no cumplía con el 75 % de datos válidos de concentración de NO₂ requeridos para establecer el cumplimiento o no de la NOM-023-SSA1-1993, por otro lado, como se observa en la Gráfica 432, para el año 2012 todas las estaciones consideradas se encuentran dentro del límite máximo permisible a excepción de la estación Agua Santa, debido a que esta presenta un promedio horario de 0.218 ppm.

Mientras que para el año 2013, solo se consideró la estación velódromo debido a que solo esta cumplía con el 75 % de datos válidos para conocer el cumplimiento de la norma mencionada anteriormente, de acuerdo con el análisis realizado se puede determinar que esta estación se encuentra dentro de los límites máximos para la concentración horaria de NO₂. De igual forma para el año 2014 de acuerdo con el criterio de suficiencia anual se consideraron solamente las estaciones BINE y Velódromo, en este año se cumplió el límite

máximo permisible establecido por la NOM-023-SSA1-1993. Para el año 2015 solo se consideraron las estaciones BINE y Agua Santa, ya que cuentan con 86% y 79% de datos válidos para la concentración del dióxido nitrógeno respectivamente, para el caso de este año, las estaciones consideradas cumplen con el límite máximo permisible de 0.210 ppm como promedio horario.

Por otro lado, para el siguiente año solo se consideró la estación UTP por el porcentaje de datos reportados para el NO₂, de igual forma que en las estaciones de monitoreo anteriores esta estación cumple con el límite establecido por la norma por parte de la Secretaría de Salud para la protección de la salud de la población mexicana.

Finalmente, para el año 2017 se consideraron la mayoría de las estaciones, dentro de las cuales están UTP, Ninfas y Velódromo, donde presentaron una concentración para el NO₂ dentro de los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-023-SSA1-1993.



Gráfica 432 Comparación de la NOM-023-SSA1-1993
Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de la REMA

En conclusión, durante el periodo evaluado 2012-2017, el dióxido de nitrógeno en su mayoría se ha encontrado por abajo del límite máximo permisible establecido por parte de la Secretaría de Salud, sin embargo, es importante enfatizar que para este contaminante criterio se tiene mucha deficiencia de datos válidos reportados por parte de las estaciones de monitoreo atmosférico, debido a esto se debe identificar los problemas más frecuentes que presentan las estaciones pertenecientes a la REMA y establecer un plan de acción contra estos.

Cumplimiento de la NOM-025-SSA1-2014

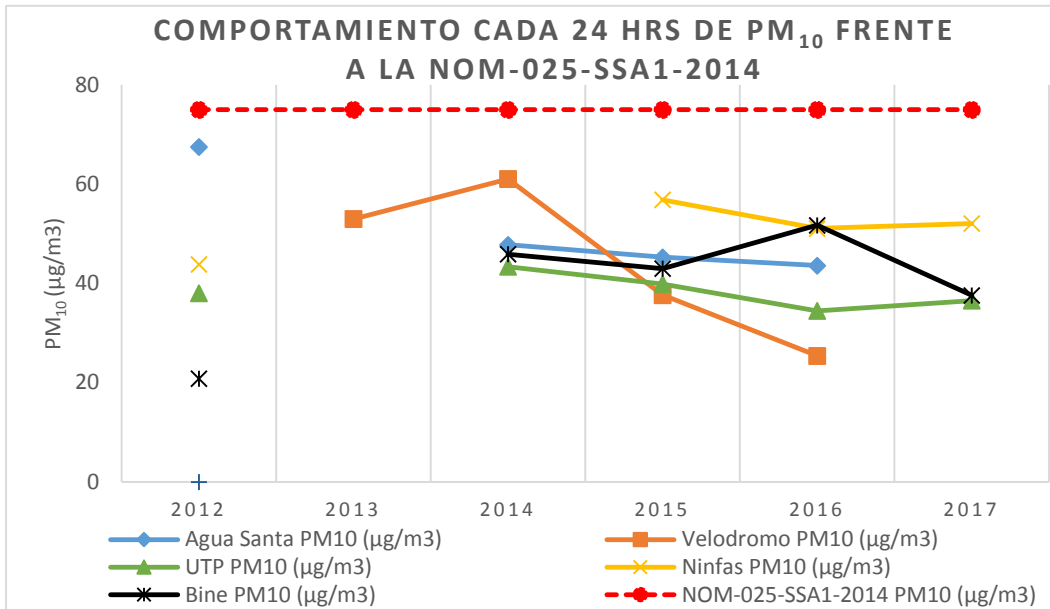
De igual forma que el contaminante anterior la Secretaría de Salud establece el límite máximo permisible para las partículas suspendidas de diámetro menor o igual a 10 micras (PM_{10}) y menor o igual a 2.5 micras ($PM_{2.5}$) en la NOM-025-SSA1-2014 de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un promedio de 24 horas para las PM_{10} , mientras que para las $PM_{2.5}$ es de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$; esta norma es de obediencia obligatoria en todo el territorio mexicano, y esta tiene como objetivo establecer un límite de concentración el cual debe no debe ser rebasado más de una vez al año para protección a la salud de la población.

De acuerdo con la NOM-025-SSA1-2014 las concentraciones de las partículas se reportarán sin cifras decimales para los promedios horarios, además de requerir al menos el 75 % de concentraciones válidas durante el año para conocer si se cumple o no los límites establecidos por esta norma.

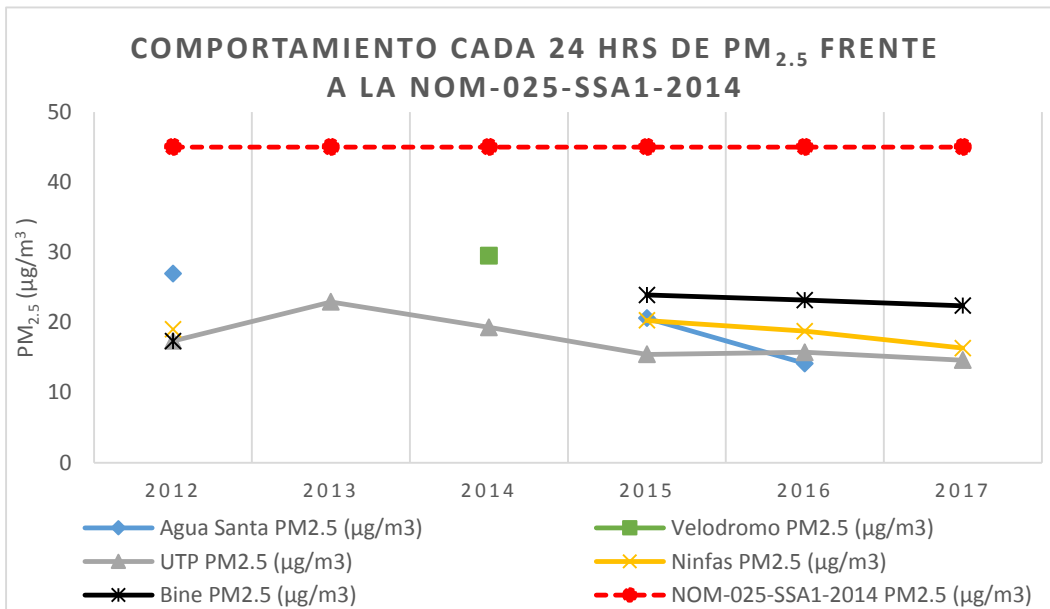
Para el caso de las partículas con diámetro aerodinámico de 10 micrómetros se consideraron solo las estaciones que cumplían con los criterios mencionados anteriormente, donde se determinó que para el periodo 2012-2017 la concentración de las PM_{10} (Gráfica 433) se mantuvo dentro del límite máximo establecido de $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en un promedio de 24 horas.

Sin embargo, las estaciones presentan concentraciones muy cercanas al promedio límite, además, que todas las estaciones presentan deficiencia de datos válidos para conocer si en ciertos años las concentraciones de las PM_{10} se encuentran o no dentro de la norma, por lo que no se debe descartar la implementación de diversos programas para la mejora de la calidad del aire, así como programas para el mantenimiento de las estaciones de monitoreo atmosférico con la finalidad que reporten un mayor porcentaje de datos válidos y a su vez conocer con mayor certeza si la concentración de partículas que se tienen dentro de municipio de Puebla.

De igual forma, para las partículas con diámetro aerodinámico 2.5 se consideraron los mismos criterios establecidos por la NOM-025-SSA1-2014, donde se determinó que en el periodo de evaluación 2012-2017 la concentración de $PM_{2.5}$ se mantienen dentro del límite máximo permisible establecido por dicha norma como se observa en la Gráfica 434. Sin embargo, se presenta una gran deficiencia de datos válidos de la concentración de $PM_{2.5}$.



Gráfica 433 Comportamiento cada 24hrs de PM₁₀ frente a la NOM-025-SSA1-2014
Fuente: Elaboración propia

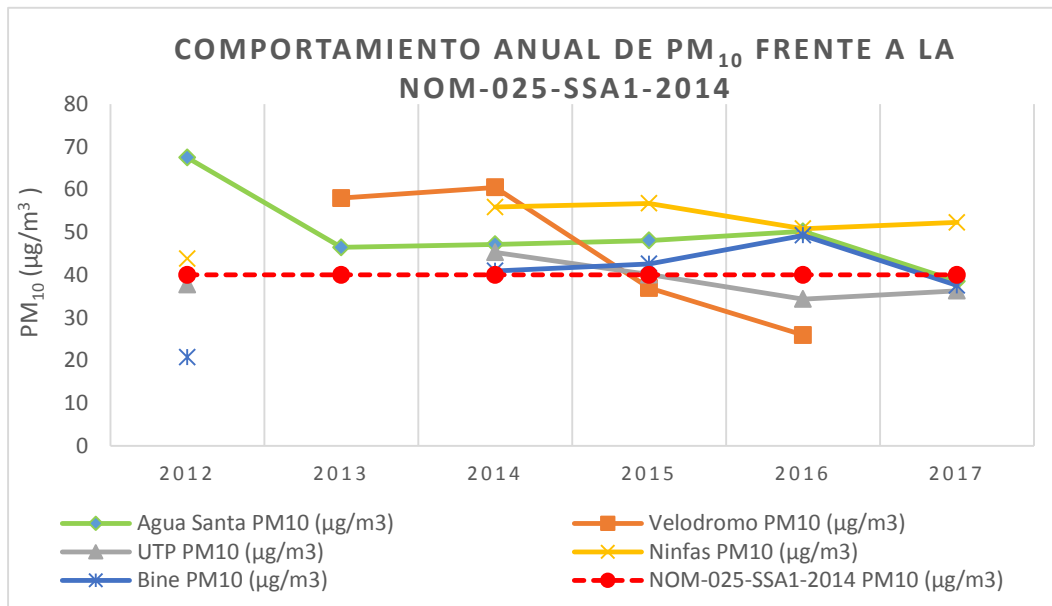


Gráfica 434 Comportamiento cada 24 hrs de PM_{2.5} frente a la NOM-025-SSA1-2014
Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, la NOM-025-SSA1-2014, también establece límites anuales para las PM₁₀ y PM_{2.5} que son de 40 µg/m³ y 12 µg/m³ respectivamente; para conocer si se cumplen con estos límites se deben tener tres trimestres al año con 75 % de concentraciones válidas, de lo contrario el año no puede ser considerado para el cumplimiento de esta norma.

Para el caso de las partículas con diámetro menor o igual a 10 micras solo se tomaron en cuenta las estaciones de monitoreo y los años que cumplían los criterios mencionados

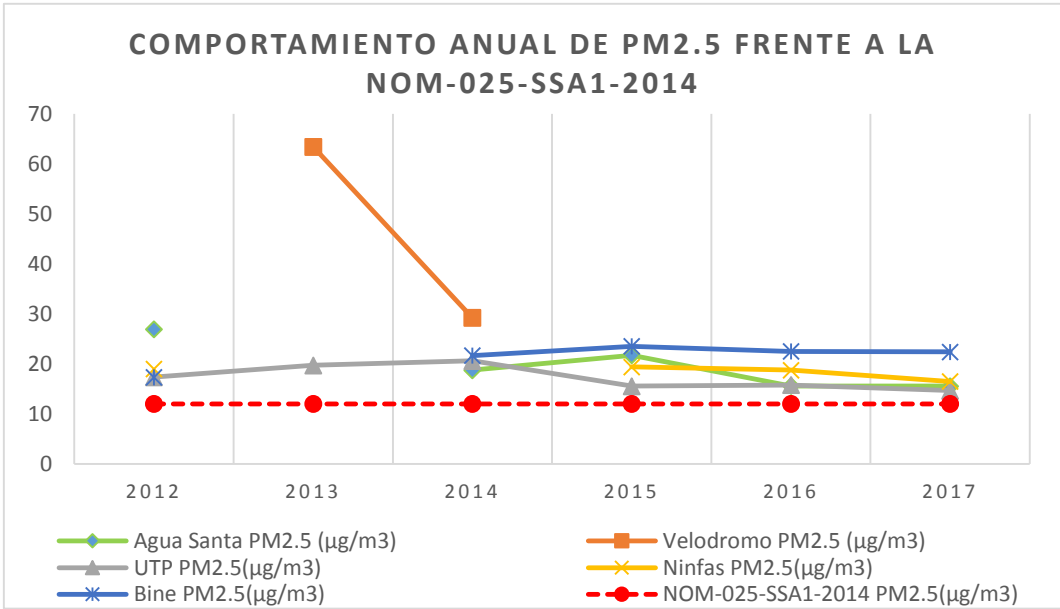
anteriormente establecidos por la norma oficial, como se muestra en la Gráfica 435, donde se observa que la mayoría de las estaciones a lo largo de periodo 2012-2017 se encuentran por arriba del máximo permisible anualmente, mientras que para el año 2017 la concentración de PM₁₀ se encuentra apenas por debajo del límite establecido por la norma.



Gráfica 435 Comportamiento anual de PM₁₀ frente a la NOM-025-SSA1-2014
Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, para el caso de promedios anuales de PM_{2.5} se consideraron las estaciones de monitoreo y años que cumplían con los criterios establecidos por la NOM-025-SSA1-2014 (Gráfica 436), de acuerdo con estos criterios durante el periodo de evaluación las concentraciones del contaminante criterio PM_{2.5} siempre se encuentran rebasando el límite máximo permisible anual establecido en dicha norma.

En ambos casos de partículas suspendidas para promedio anual se encuentra una gran deficiencia de concentraciones válidas, por lo que no se puede considerar en muchos casos ciertos años para la evaluación del cumplimiento de esta norma. Es por esto, como ya se mencionó anteriormente que existe la necesidad de implementación de mantenimiento continuo a las estaciones de monitoreo atmosférico pertenecientes a la REMA, con la finalidad de que reporten un mayor número de datos válidos, además de la implementación de programas para el control de la calidad del aire.



Gráfica 436 Comportamiento anual de PM_{2.5} frente a la NOM-025-SSA1-2014
Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

Con la realización de esta investigación se logró analizar el comportamiento que presentan los contaminantes criterio frente a las variables meteorológicas, temperatura, precipitación y velocidad y dirección del viento, en el Municipio de Puebla el cual era el objetivo principal, donde se puede concluir que la concentración de los contaminantes respecto a la temperatura tiene principalmente dos comportamientos, el primero se presenta cuando existe una mayor temperatura en el ambiente y a su vez mayor concentración del contaminante, los contaminantes que presentan este comportamiento son el CO, SO₂, O₃, PM₁₀, PM_{2.5}. Por otro lado, en el segundo comportamiento con una mayor temperatura en el ambiente menor será la concentración del contaminante criterio como es el caso del NO₂.

De igual forma los contaminantes criterio respecto a la precipitación en el Municipio de Puebla la gran mayoría, presentan un comportamiento en común, donde al aumentar la precipitación la concentración de los contaminantes disminuye.

Finalmente, los contaminantes criterio frente a la velocidad del viento presentan un comportamiento en común donde al aumentar la velocidad del viento la concentración del contaminante disminuirá, este comportamiento se observa en todos los contaminantes criterio en el Municipio de Puebla; el caso de las partículas, a pesar de que en las gráficas realizadas se observa este comportamiento, cuando se realiza un análisis diario se puede observar un comportamiento contrario, es decir, al aumentar la velocidad del viento la concentración de las partículas aumentan, debido a que son suspendidas por el viento, causando una mayor concentración de material particulado en el ambiente.

Por otro lado, de acuerdo con los datos de la dirección del viento analizados, se puede concluir que los contaminantes serán en su mayoría dispersados desde el Norte del municipio de Puebla al Sur, causando una sinergia entre los contaminantes emitidos por las industrias y los contaminantes provenientes del transporte vehicular del centro del Municipio.

Además, se observó que los contaminantes criterio tienen diferentes comportamientos con respecto a las estaciones del año, para el caso del CO, NO₂, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5} existe mayor concentración de estos contaminantes en primavera- invierno y menor concentración otoño-verano; por otro lado, el ozono presenta una mayor concentración en verano-otoño que en invierno-primavera.

De igual forma se logró analizar las tendencias del comportamiento de los contaminantes criterios a lo largo del periodo 2012-2017 donde se puede concluir que para el caso de las $PM_{2.5}$, PM_{10} , CO, SO_2 su concentración presenta una tendencia de disminución, lo cual se puede deber a la implementación de estrategias como el fomento al uso de transporte no motorizados, implementación de calentadores solares, control de emisiones de fuentes fijas y plan de regularización de licencias de funcionamientos. Mientras que para el caso del NO_2 se tiene un comportamiento variable a lo largo del periodo de estudio debido a que en algunas estaciones se presentan tendencias de aumento mientras que, en otras tendencias de disminución, además se debe considerar que en algunas estaciones no tienen los datos suficientes para realizar una conclusión certera de la tendencia. Por otro lado, para el caso del ozono se puede concluir que ha presentado un aumento en su concentración a lo largo del periodo de estudio, esto principalmente es causado por el crecimiento del parque vehicular dentro del municipio en un 12 % desde el año 2012, creación de nuevas viviendas, al establecimiento de diversas industrias alrededor del municipio de Puebla, por lo anterior se debe darle seguimiento a diversas medidas ya establecidas para el control de emisiones a la atmósfera con la finalidad de controlar la concentración de los contaminantes, lo cual contribuirá a la calidad del aire del Municipio de Puebla; además de prevenir la corrosión de materiales y el deterioro de cultivos.

Además de concluir que los contaminantes criterio a lo largo de este periodo de estudio se encontraron en su mayoría dentro de los límites máximos permisibles establecidos por la normatividad de la Secretaría de Salud, a excepción del ozono que, rebasa sus dos límites establecidos en la normatividad, promedios horarios y promedios de ocho horas. Asimismo del ozono, las PM_{10} rebasaron el límite del promedio anual permisible en todas las estaciones del 2012 al 2015, sin embargo, para los años 2016 y 2017 las estaciones de monitoreo UTP y Velódromo, reportaron que la concentración anual estaba dentro del límite establecido por la Secretaría de Salud de $40 \mu g/m^3$, para el caso de las $PM_{2.5}$ rebasaron el límite máximo permisible en los promedios anuales en todas las estaciones a lo largo de todo el periodo de estudio; en ambos casos se encuentra una gran deficiencia de concentraciones válidas, por lo que existe la necesidad de implementación de mantenimiento continuo a las estaciones de monitoreo atmosférico pertenecientes a la REMA, poniendo especial cuidado en estos contaminantes debido, a que, al rebasar los límites permisibles establecidos por la normatividad, la calidad del aire del Municipio de Puebla se ve afectada.

Finalmente, se determina que la calidad del aire en el Municipio de Puebla es *regular* para el periodo 2012-2017, de acuerdo con el análisis realizado de los patrones meteorológicos más frecuentes en la zona estudio y la dispersión de los contaminantes como consecuencia de estos, además de conocer que la mayoría de los contaminantes criterio siguen una tendencia de disminución en su concentración a lo largo del periodo de estudio y que sus concentraciones a excepción del material particulado y el ozono se encuentran dentro de los límites máximos permisibles establecidos por las Normas Oficiales Mexicanas.

Por lo anterior, es necesario seguir abordando temas relacionados con la contaminación del aire tanto por parte de alumnos e investigadores, así como que el gobierno les dé seguimiento a las medidas ya implementadas para el control de emisiones y el cuidado de la calidad del aire, además de priorizar el cuidado de las estaciones de monitoreo atmosférico con la finalidad de que proporcionen una mayor cantidad de datos válidos.

Recomendaciones

En base a los resultados obtenidos en esta investigación es importante mencionar que se tiene un rumbo para establecer estrategias a mediano y largo plazo en el desarrollo de nuevas investigaciones como son:

- Análisis del comportamiento de los contaminantes criterio frente a la variable meteorológica radiación solar,
- Análisis estadístico de la correlación variable meteorológica-contaminante,
- Modelos de dispersión de los contaminantes en el municipio de Puebla con base en las diferentes fuentes que se encuentran en el área de estudio.
- Análisis de la correlación entre la calidad del aire y el cambio climático.
- Estudio de la relación existente entre la calidad del aire y las muertes en el Municipio de Puebla.
- Mapas de la distribución espacial de la concentración de los contaminantes en el Municipio de Puebla.

Aportaciones

El último informe de la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de Puebla con base en los datos reportados por la REMA, fue en el 2011 y a la fecha, no se tiene un documento de la calidad de aire en el Municipio de Puebla, dicho documento se conoce como Programa de Gestión de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla 2006-2011. Por lo que el presente estudio, permitirá la actualización de los datos contando con información de los años 2012-2017.

Además, de que la investigación realizada, muestra la relación de la meteorología con el transporte y dispersión de los contaminantes criterio en el Municipio de Puebla.

Esta información puede ser requerida para modelos de la calidad del aire, como redes neuronales estadísticas y el modelo gaussiano avanzado, que son utilizados en escenarios prospectivos considerando la relación variable meteorológica-contaminante.

El estudio puede ser utilizado para promover y justificar la ampliación de la red de monitoreo atmosférico (estaciones fijas y móviles) y estaciones meteorológicas en la ciudad de Puebla.

Por otra parte, el análisis se puede relacionar con otros eventos meteorológicos con el objetivo de conocer las tendencias positivas y negativas ante la variabilidad natural y el cambio climático y así tomar acciones de mitigación para reducir la vulnerabilidad de la población expuesta.

El estudio puede tener la posibilidad de cambiar la legislación mexicana en los límites máximos permisibles en beneficio de la población, además de mostrar la importancia de la existencia de políticas ambientales puestas en marcha por el gobierno para el control de estos contaminantes.

Finalmente, la investigación, apoyará a los académicos, en la actualización de los datos para que los alumnos, puedan conocer el comportamiento de los contaminantes criterio y poder proponer estrategias en la solución de la contaminación ambiental.

Con el principal objetivo de mejorar la calidad del aire, con la puesta en marcha de programas que permitan disminuir o manejar el riesgo a la exposición de la población a los contaminantes atmosféricos.

Bibliografía

- Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. (2012). *Monóxido de carbono*. Atlanta, USA: DEPARTAMENTO DE SALUD Y SERVICIOS HUMANOS de los EE.UU.
- Aguilar, C. (1998). *Análisis de la evaluación de la contaminación del aire de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. Ciudad de México, México: UNAM.
- Aránguez, E., & Ordóñez, J. M. (Abril de 1999). Contaminantes Atmosféricos y su vigilancia. *Salud Pública, II*, 123-132.
- Arya, S. P. (1999). *Air Pollution Meteorology and Dispersion*. New York: Oxford University Press.
- Cabrera, F. (2008). *Evaluación de un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos con la técnica espectroscópica DOAS pasiva*. México: UNAM.
- Caminolli, I., & Vera, C. (2004). *La atmósfera*. España: Ministerio de Educación Ciencia y Tecnología.
- Carrascal, D., & Puigcerver, M. (2008). *El medio atmosférico: meteorología y contaminación*. Universidad de Barcelona.
- Coordinación de contaminación y Salud Ambiental . (2016). *Elaboración de la línea base de exposición personal a contaminantes atmosférico en la Ecozona de Cuernavaca, Morelos*. Ciudad de México.
- Crespo, P. M. (2017). *Análisis del depósito atmosférico y caracterización experimental de partículas suspendidas en la Ciudad de México*. Puebla, México: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Dirección de Calidad del Aire. (2012). *Programa de Gestión de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de Puebla 2006-2011*. México: SEMARNAT.
- E. Roberts Alley & Associates, Inc. (2001). *Manual de control de la calidad del aire*. McGraw Hill.

- Environmental Protection Agency. (22 de Agosto de 2016). *Centro de Información sobre Contaminación de Aire (CICA) para la frontera entre EE. UU. - México*. Obtenido de Calidad del Aire fronterizo: https://www3.epa.gov/ttnca1/cica/airq_s.html
- Espert, V., & Amparo, L. (2004). *Dispersión de contaminantes en la atmósfera*. México: Alfaomega.
- Galindo, I. (1999). *Librería de Software de procedimientos meteorológicos para modelos dispersión de contaminantes*. Cuernavaca, Morelos: Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico.
- Garcia, J. (Diciembre de 2009). Influencia de la meteorología en la calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México. *Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 12(2), 83-86.
- García, J. (2010). *Análisis de la calidad del aire en la cuenca atmosférica del bajío, México mediante modelación: estudio caso 2008*. Ciudad de México, México: UNAM.
- Gobierno de La ciudad de México. (2016). *Sistema de Monitoreo Atmosférico de la Ciudad de México*. Obtenido de Monitoreo de la calidad del aire: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php?opc=%27ZaBhnml=&dc=%27Yw=>
=
- H. Ayuntamiento de Puebla 2011-2014. (2011). *Programa Municipal de Desarrollo 2011-2014*. Puebla, Puebla: Gobierno Municipal Puebla.
- H. Ayuntamiento de Puebla 2014-2018. (2014). *Plan Municipal de Desarrollo 2014-2018*. Puebla, Puebla: Gobierno municipal de Puebla.
- INECC. (15 de Noviembre de 2007). *Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático*. Obtenido de Calidad del Aire y Efectos a la Salud: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/233/cap4.html>

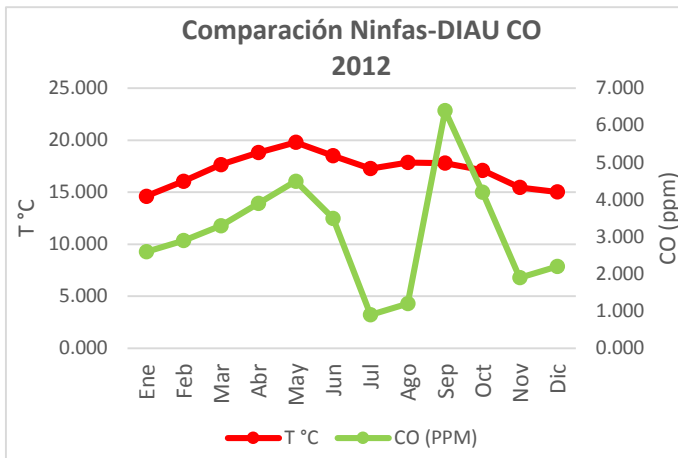
- Instituto Nacional de Ecología. (2011). *Cuarto almanaque de datos y tendencias de la calidad del aire en 20 ciudades mexicanas (2000-2009)*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2017). *Evaluación de los impactos en la concentración de ozono por la aplicación de estrategias integradas de control de emisiones en la Megalópolis*. Ciudad de México.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2017). *Informe Nacional de la calidad del aire 2016, Mexico*. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación sobre la Calidad del Aire y los Contaminantes Climáticos. Ciudad de México.
- López, F. (2016). *Análisis climatológico de la región centro del país*. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental.
- Montero, C. (2011). *Pronostico de la calidad del aire en el área Metropolitana de la Ciudad de México a través del análisis de las series de tiempo de los componentes del IMECA*. Ciudad de México: Universidad Iberoamericana.
- Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Obtenido de https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf;jsessionid=09C2E7BEB40FC4ED2FB0039FB7DBC658?sequence=1
- Orozco, C., Pérez, A., González, N., & Francisco, R. (2003). *Contaminación Ambiental: Una visión desde la química* (Primera ed.). (U. d. Burgos, Ed.) Madrid, España: PARANINFO CENGAGE Learning.
- Pérez, A. (2010). *Programación lineal aplicada al control de emisiones contaminantes*. Ciudad de México, México: UNAM.

- Potrillo, A. K. (2017). *Diagnóstico de la calidad del aire en el sector noroeste de la zona metropolitana de Aguascalientes*. Puebla, México: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- ProAire. (2012). Programa de Gestión de la Calidad del Aire del Estado de Puebla 2012-2020. En S. d. Territorial. Puebla, México.
- Protección Civil del Municipio de Puebla. (2010). *Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Puebla*. Puebla, Puebla: Gobierno Municipal de Puebla.
- Sanchez, J. (1999). *Importancia de la evaluación de la calidad del aire por ozono en la zona suroeste de la Ciudad de México*. Ciudad de México, México: UNAM.
- Santos, J. (2009). *Composición química de partículas atmosféricas al noroeste de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México: marzo 2006*. Ciudad de México, México: UNAM.
- Secretaría del Medio Ambiente. (2018). NADF009-AIRE-2017 QUE ESTABLECE LOS REQUISITOS PARA ELABORAR EL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE MÉXICO.
- SEMARNAT. (2012). *NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- SEMARNAT. (2013). Calidad del aire: una práctica de vida. En S. d. Naturales. Ciudad de México, México.
- Spiro, T., & Stigliani, W. (2004). *Química Medioambiental* (Segunda ed.). (P. University, Ed.) Madrid, España: PEARSON EDUCACIÓN, S.A.
- Traviño, M. (2000). *Calidad del aire de Santa Fe de Bogotá y propuesta de un índice de calidad*. México: UNAM.
- Union of Concerned Scientists. (2011). *El Ozono y la Salud*. Estados Unidos: Union of Concerned Scientists.

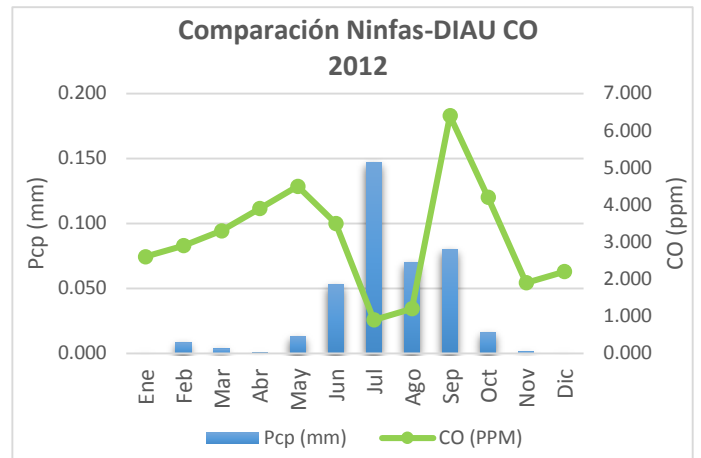
- Vallejo, M. d. (2015). *Asociación entre algunos contaminantes ambientales del aire y la presencia de la faringitis en universitarios de las áreas de la salud y del complejo cultural universitario*. Puebla, México: Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Vega, E., & Martínez, G. (2004). *Estudio Integral de partículas atmosféricas en la Ciudad de México*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Petróleo Innovar.
- Vega, J. C. (2007). *Química del Medio Ambiente* (Segunda ed.). Chile: ALFAOMEGA GRUPO EDITOR S.A de C.V.
- Wark, K., & Warner, C. (2012). *Contaminación del aire origen y control*. (U. d. Purdue, Ed.) Londres, Inglaterra: Limusa.

Anexo 1 Comparaciones

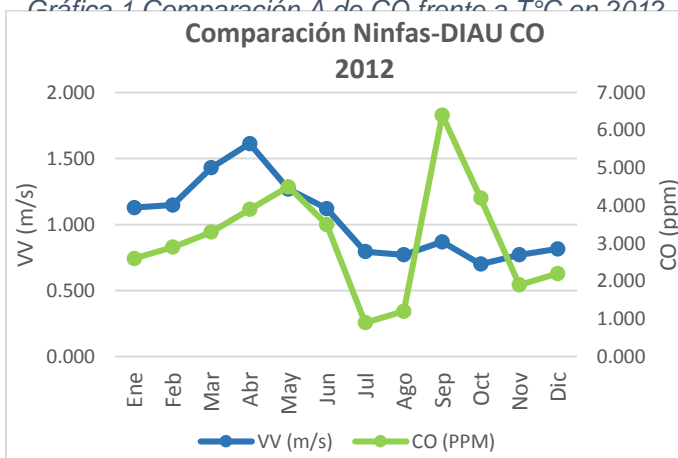
Monóxido de Carbono (CO)



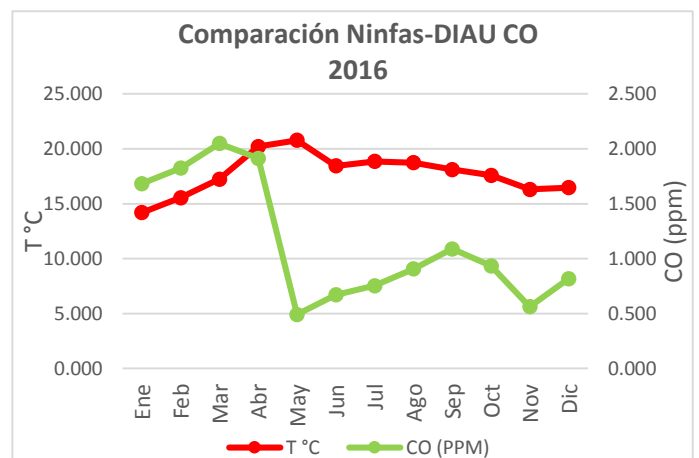
Gráfica 1 Comparación A de CO frente a T°C en 2012
Fuente: Elaboración propia



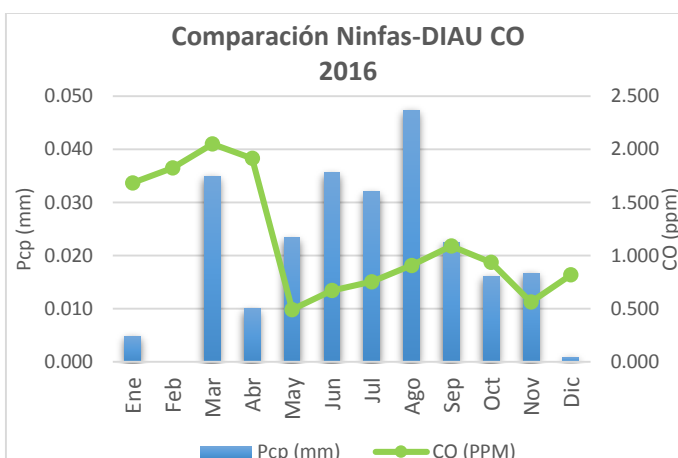
Gráfica 2 Comparación A de CO frente a PCP en 2012
Fuente: Elaboración propia



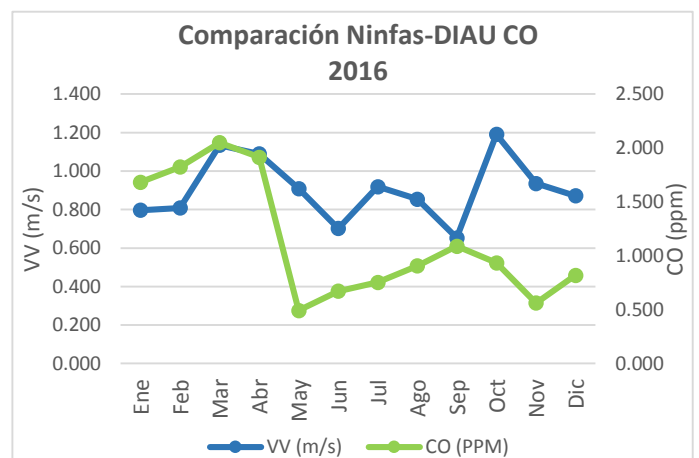
Gráfica 3 Comparación A de CO frente a VV en 2012
Fuente: Elaboración propia



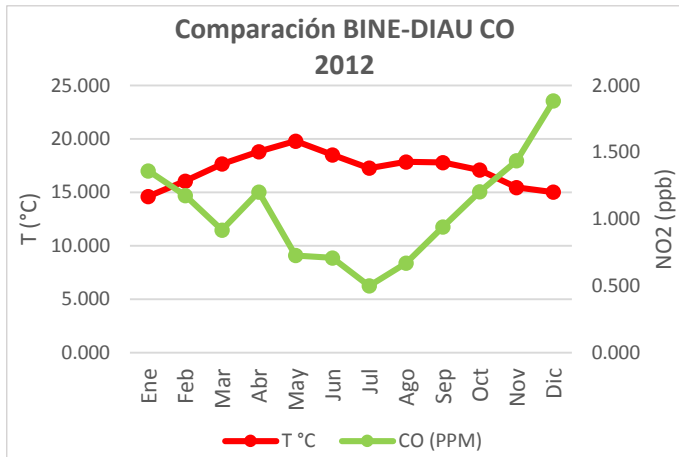
Gráfica 4 Comparación A de CO frente a T°C en 2016
Fuente: Elaboración propia



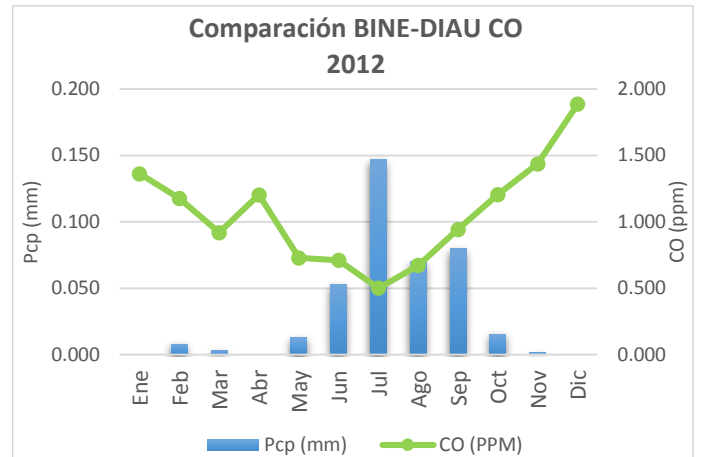
Gráfica 5 Comparación A de CO frente a PCP en 2016
Fuente: Elaboración propia



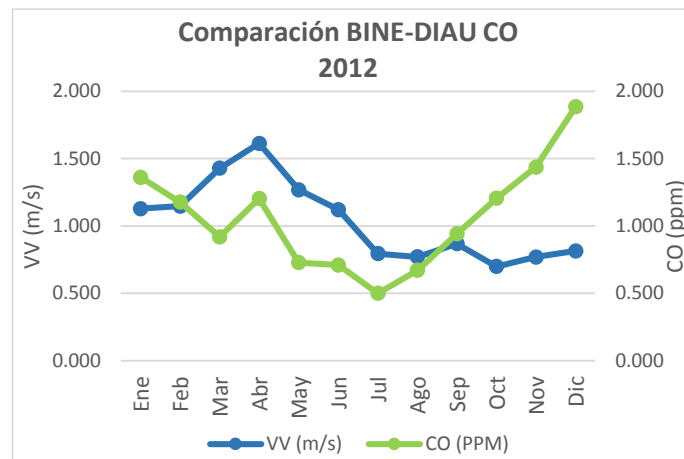
Gráfica 6 Comparación A de CO frente a VV en 2016
Fuente: Elaboración propia



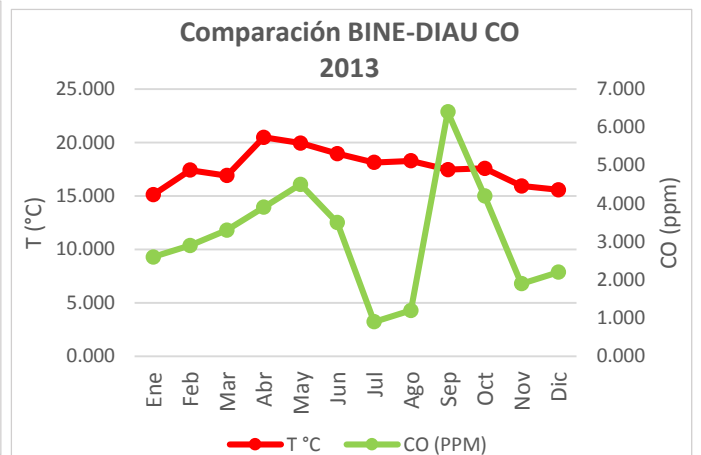
Gráfica 7 Comparación B de CO frente a T° C en 2012
Fuente: Elaboración propia



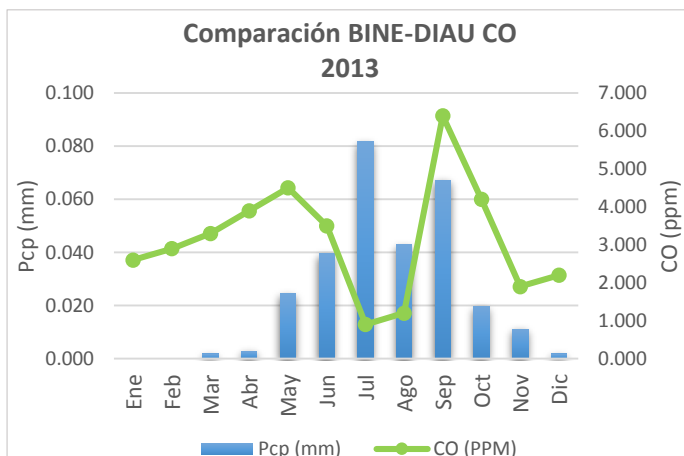
Gráfica 8 Comparación B de CO frente a Pcp en 2012
Fuente: Elaboración propia



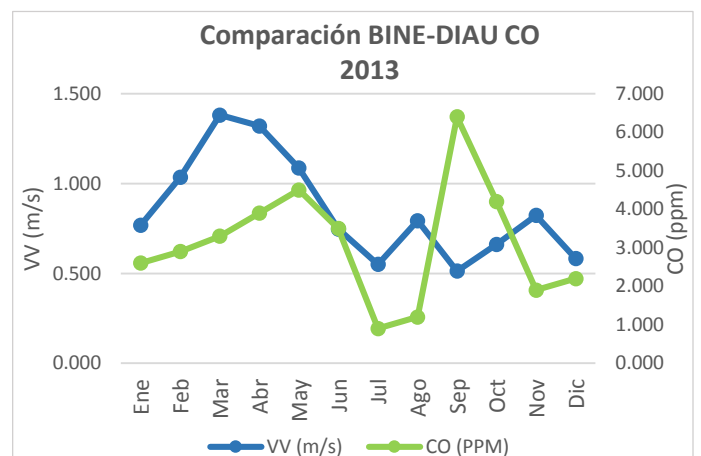
Gráfica 9 Comparación B de CO frente a VV en 2012
Fuente: Elaboración propia



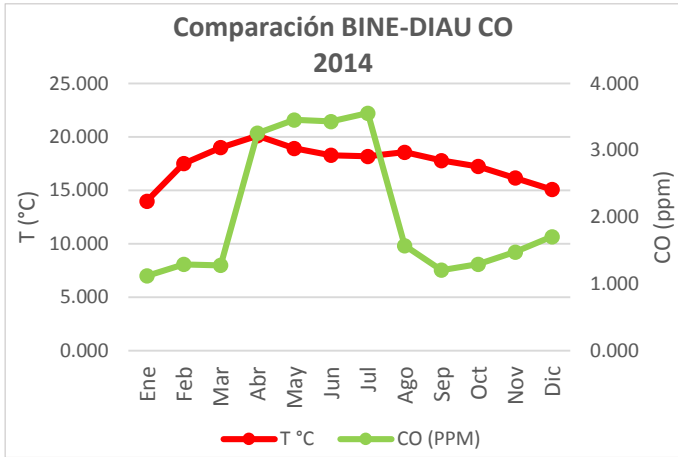
Gráfica 10 Comparación B de CO frente a T° C en 2013
Fuente: Elaboración propia



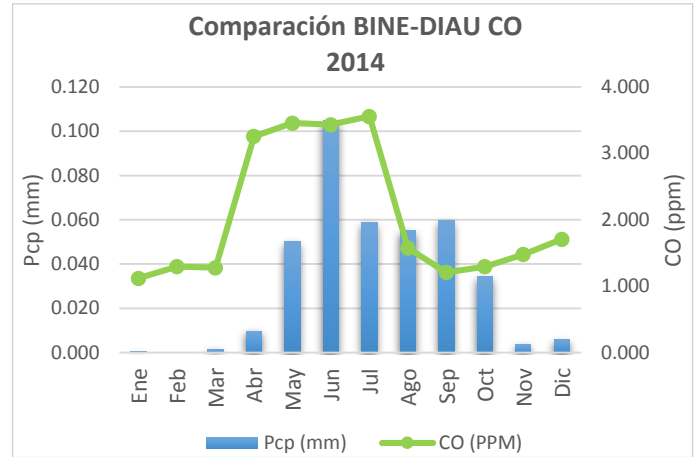
Gráfica 11 Comparación B de CO frente a Pcp en 2013
Fuente: Elaboración propia



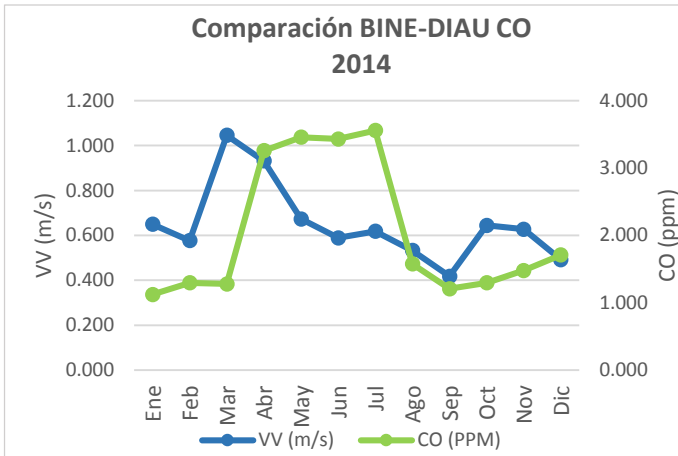
Gráfica 12 Comparación B de CO frente a VV en 2013
Fuente: Elaboración propia



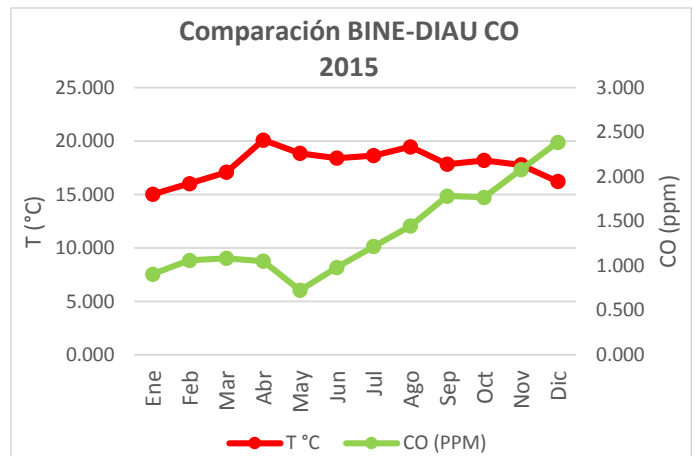
Gráfica 13 Comparación B de CO frente a T °C en 2014
Fuente: Elaboración propia



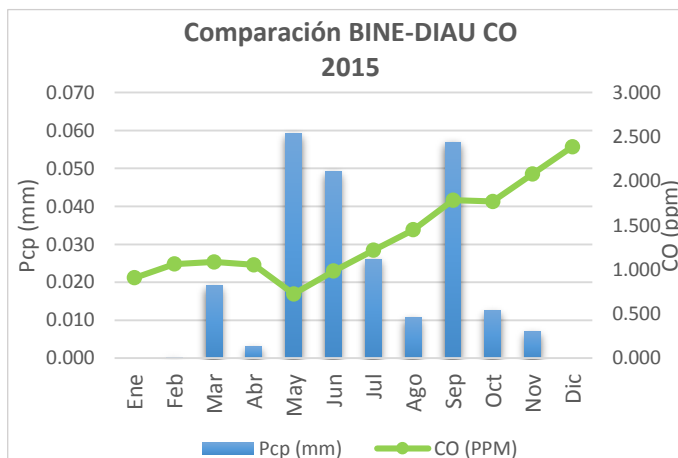
Gráfica 14 Comparación B de CO frente a Pcp en 2014
Fuente: Elaboración propia



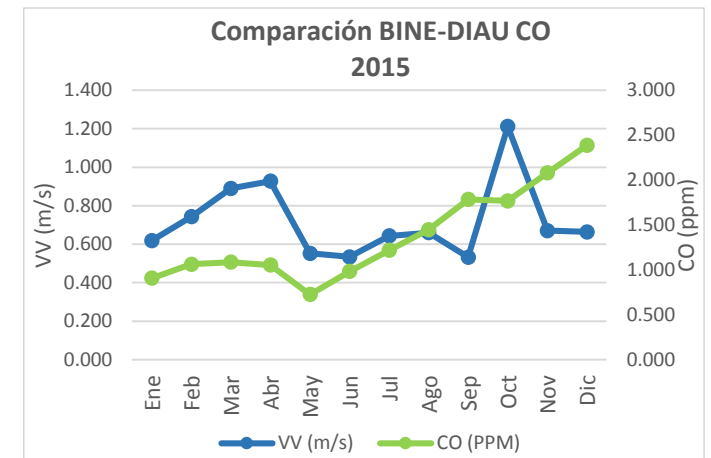
Gráfica 15 Comparación B de CO frente a VV en 2014
Fuente: Elaboración propia



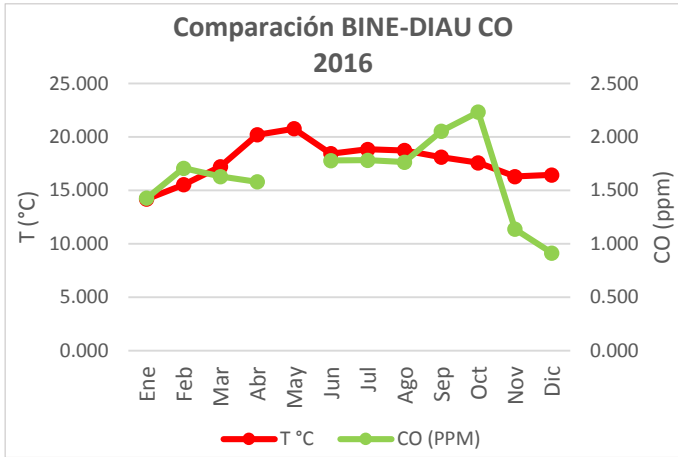
Gráfica 16 Comparación B de CO frente T °C en 2015
Fuente: Elaboración propia



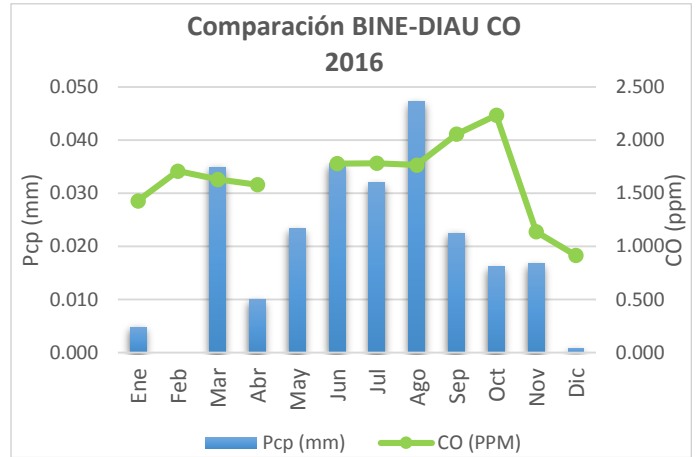
Gráfica 17 Comparación B de CO frente a Pcp en 2015
Fuente: Elaboración propia



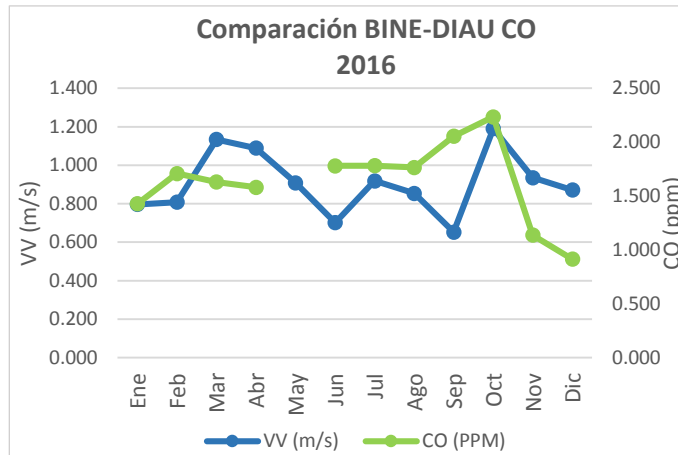
Gráfica 18 Comparación B de CO frente a VV en 2015
Fuente: Elaboración propia



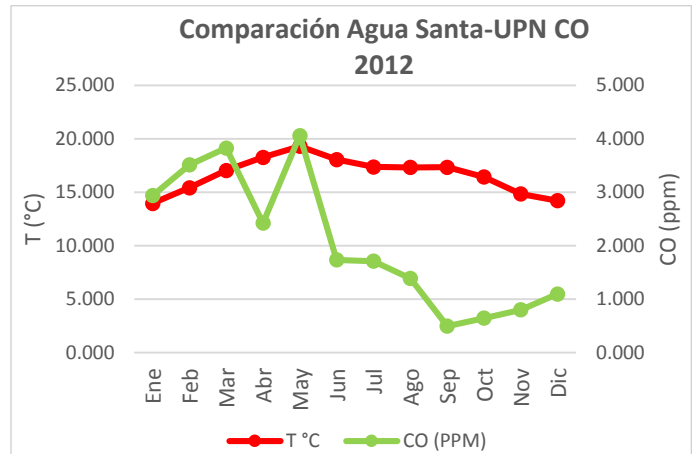
Gráfica 19 Comparación B de CO frente a T° C en 2016 !
Fuente: Elaboración propia



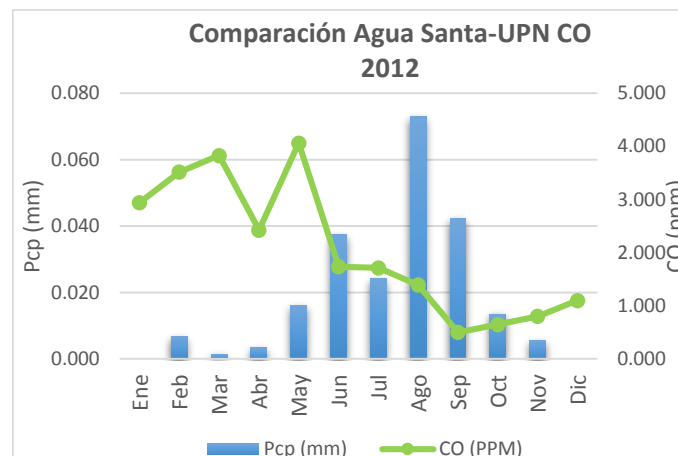
Gráfica 20 Comparación B de CO frente a Pcp en 2016 !
Fuente: Elaboración propia



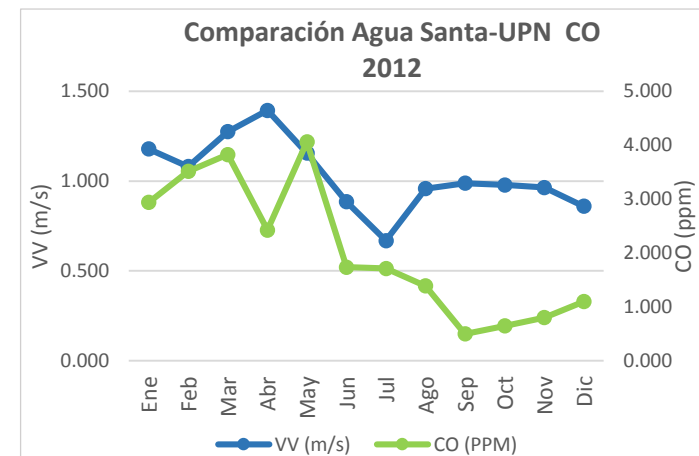
Gráfica 21 Comparación B de CO frente a VV en 2016
Fuente: Elaboración propia



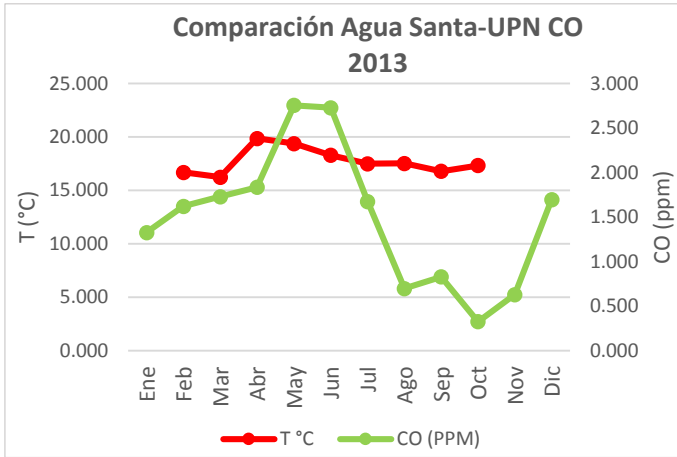
Gráfica 22 Comparación C de CO frente a T° C en 2012
Fuente: Elaboración propia



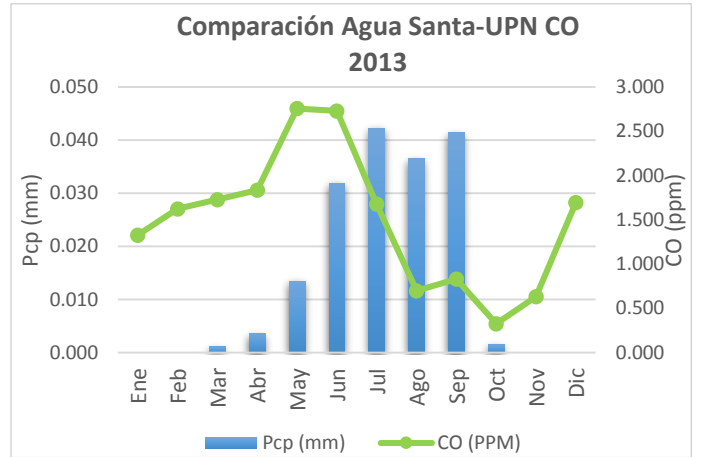
Gráfica 23 Comparación C de CO frente a Pcp en 2012
Fuente: Elaboración propia



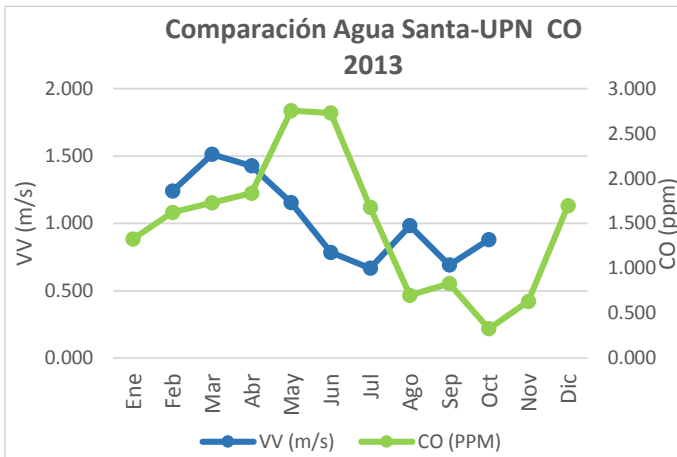
Gráfica 24 Comparación C de CO frente a VV en 2012
Fuente: Elaboración propia



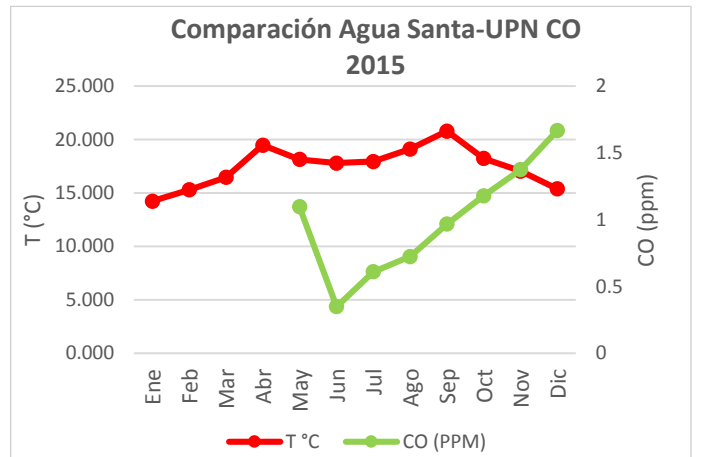
Gráfica 25 Comparación C de CO frente a T°C en 2013
Fuente: Elaboración propia



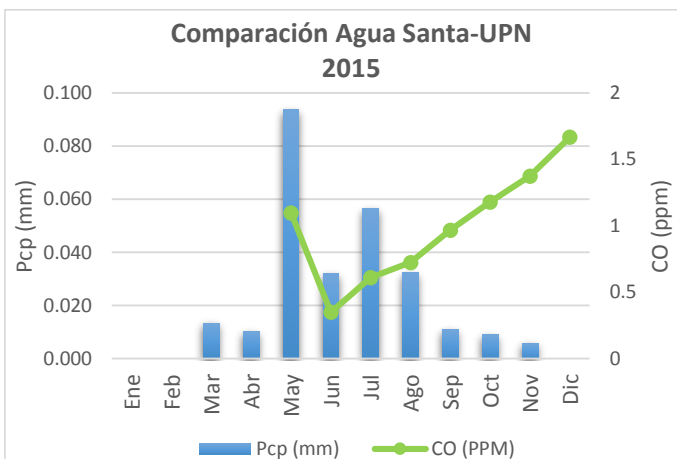
Gráfica 26 Comparación C de CO frente a Pcp en 2013
Fuente: Elaboración propia



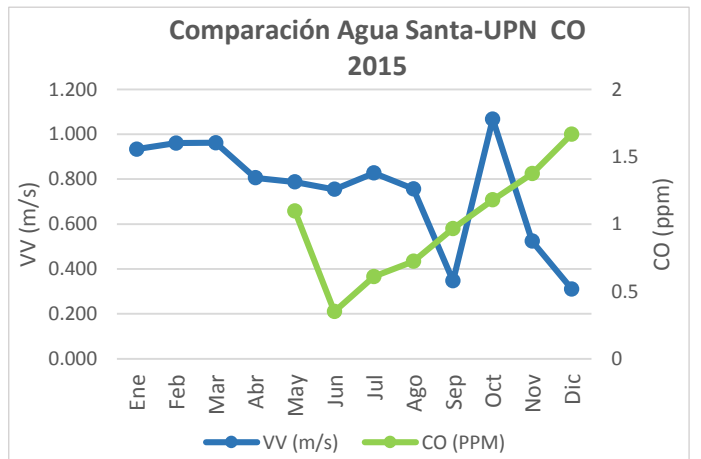
Gráfica 27 Comparación C de CO frente a VV en 2013
Fuente: Elaboración propia



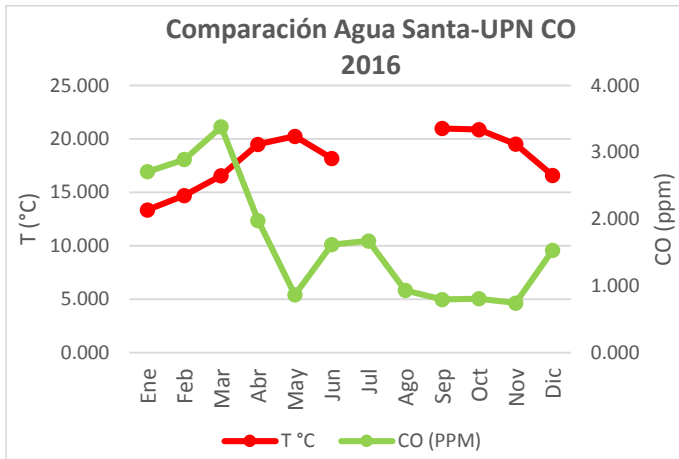
Gráfica 28 Comparación C de CO frente a T°C en 2015
Fuente: Elaboración propia



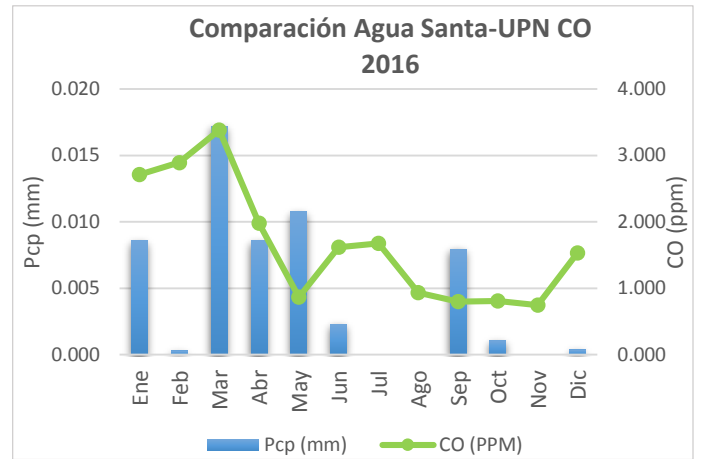
Gráfica 29 Comparación C de CO frente a Pcp en 2015
Fuente: Elaboración propia



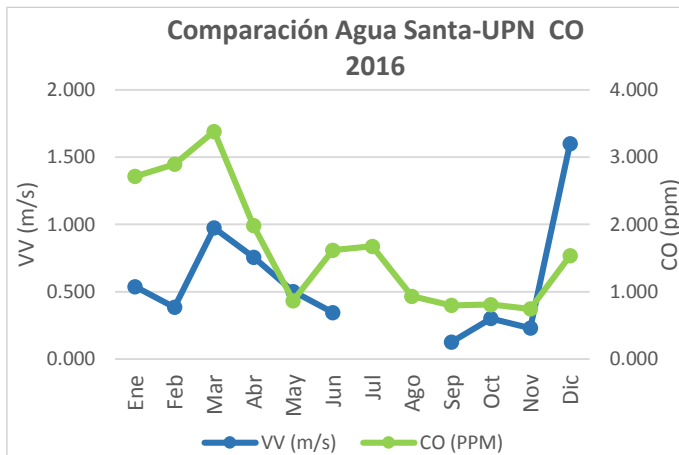
Gráfica 30 Comparación C de CO frente a VV en 2015
Fuente: Elaboración propia



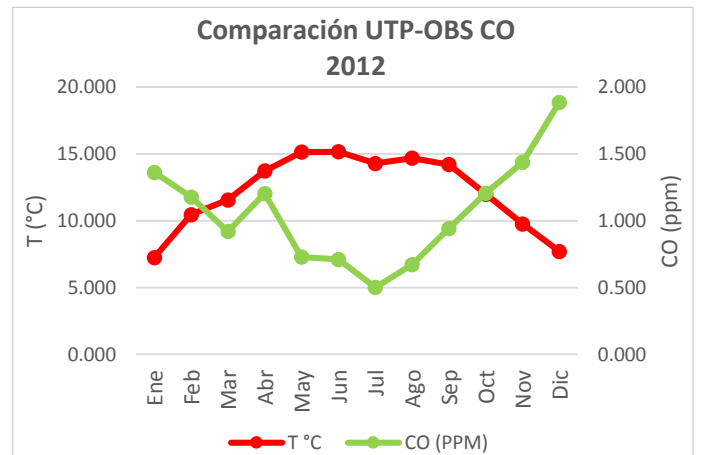
Gráfica 31 Comparación C de CO frente a T°C en 2016
Fuente: Elaboración propia



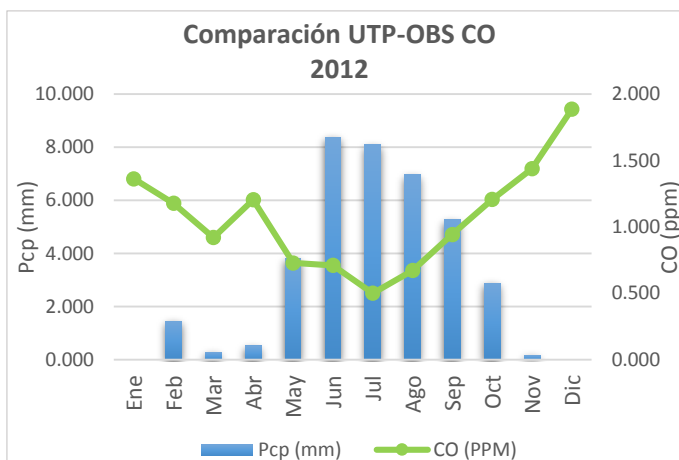
Gráfica 32 Comparación C de CO frente a Pcp en 2016
Fuente: Elaboración propia



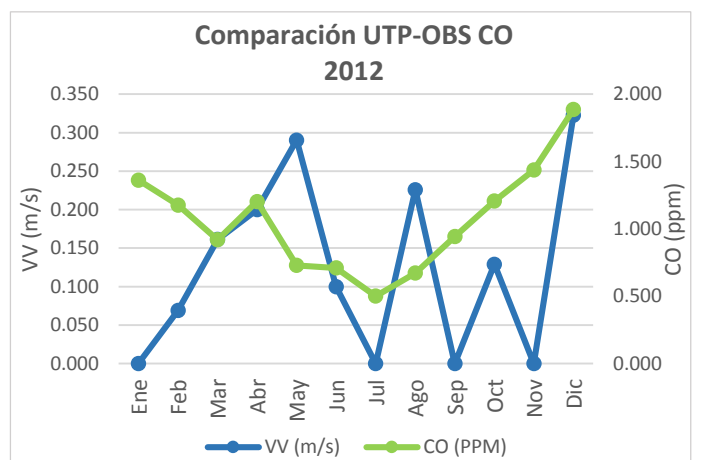
Gráfica 33 Comparación C de CO frente a VV en 2016
Fuente: Elaboración propia



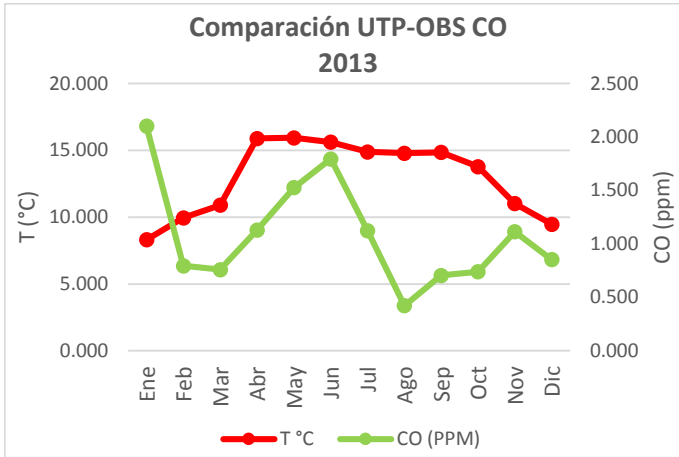
Gráfica 34 Comparación D de CO frente a T°C en 2012
Fuente: Elaboración propia



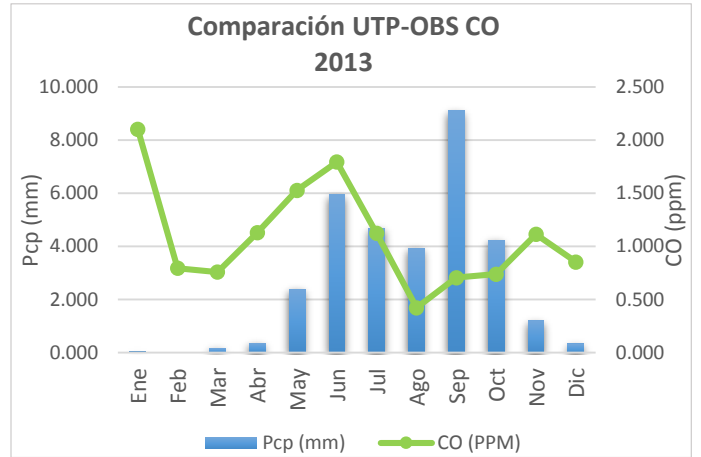
Gráfica 35 Comparación D de CO frente a Pcp en 2012
Fuente: Elaboración propia



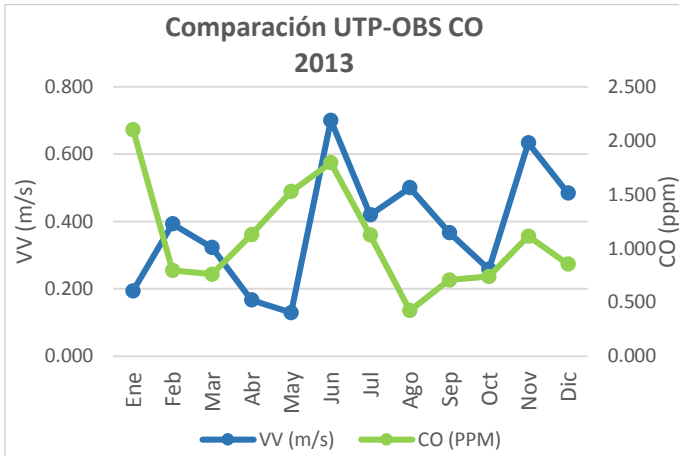
Gráfica 36 Comparación D de CO frente a VV en 2012
Fuente: Elaboración propia



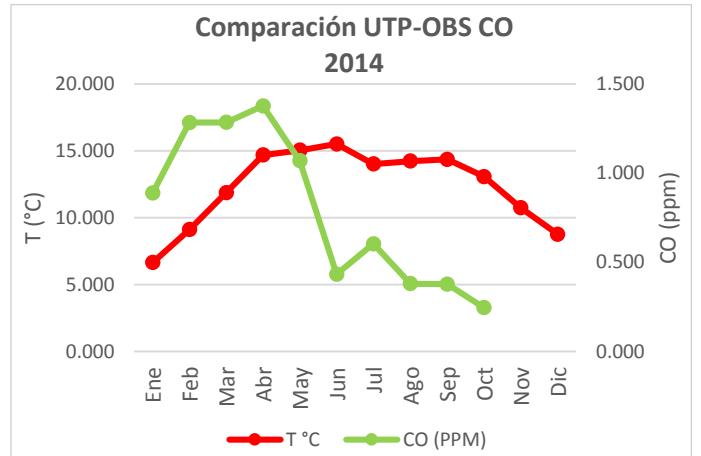
Gráfica 37 Comparación D de CO frente a T°C en 2013
Fuente: Elaboración propia



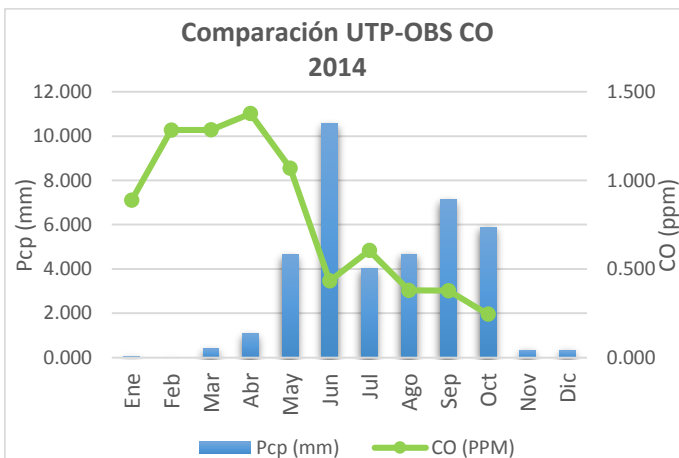
Gráfica 38 Comparación D de CO frente a Pcp en 2013
Fuente: Elaboración propia



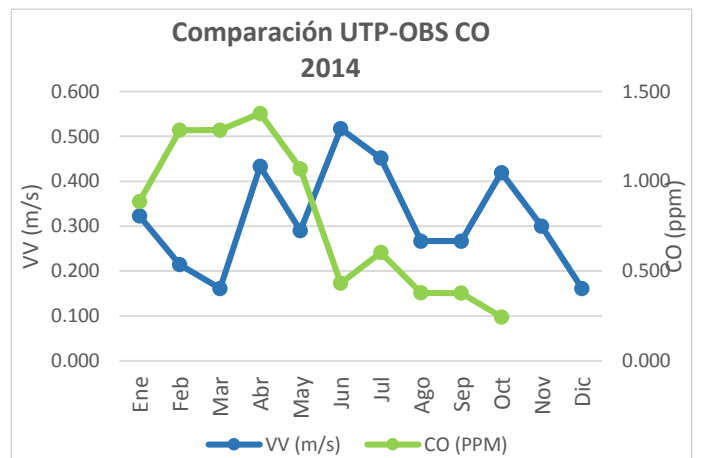
Gráfica 39 Comparación D de CO frente a VV en 2013
Fuente: Elaboración propia



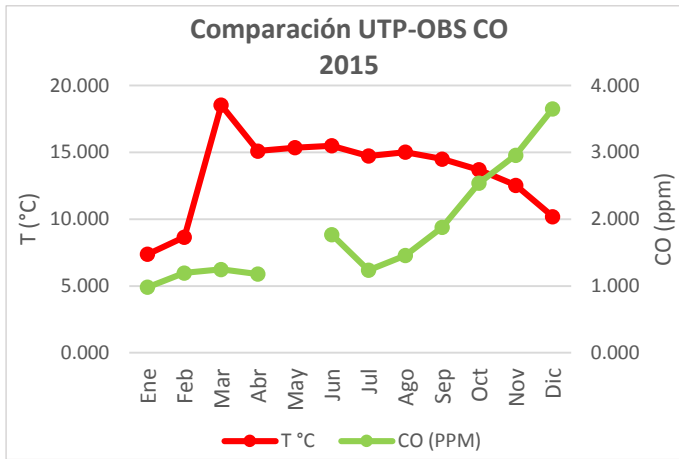
Gráfica 40 Comparación D de CO frente a T°C en 2014
Fuente: Elaboración propia



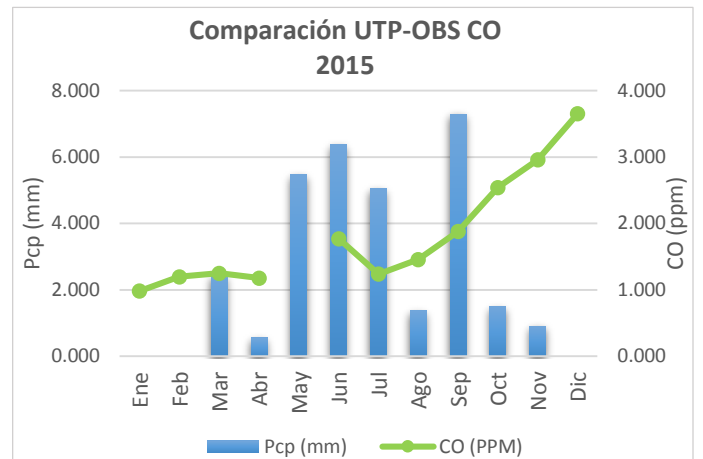
Gráfica 41 Comparación D de CO frente a Pcp en 2014
Fuente: Elaboración propia



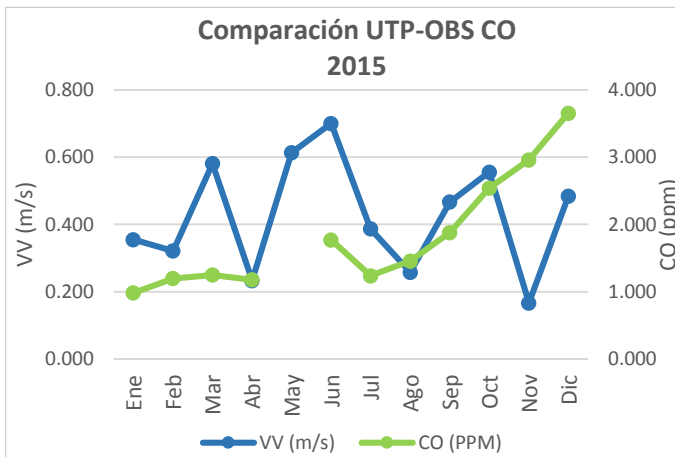
Gráfica 42 Comparación D de CO frente a VV en 2014
Fuente: Elaboración propia



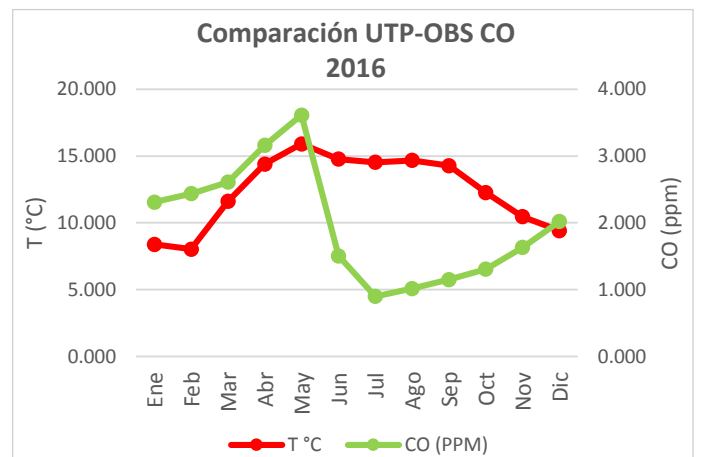
Gráfica 43 Comparación D de CO frente a T°C en 2015
Fuente: Elaboración propia



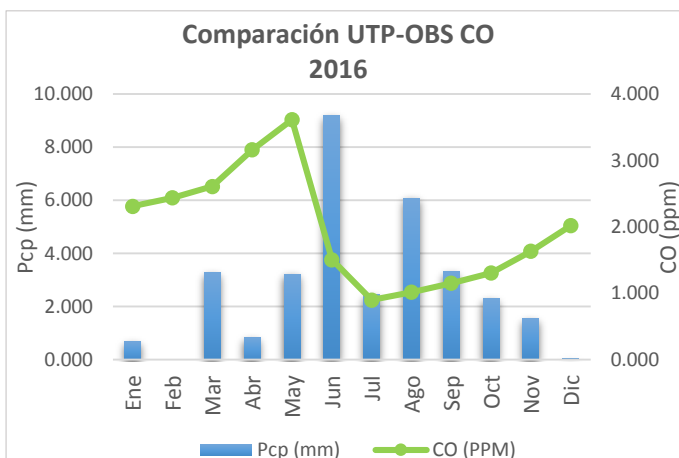
Gráfica 44 Comparación D de CO frente a Pcp en 2015
Fuente: Elaboración propia



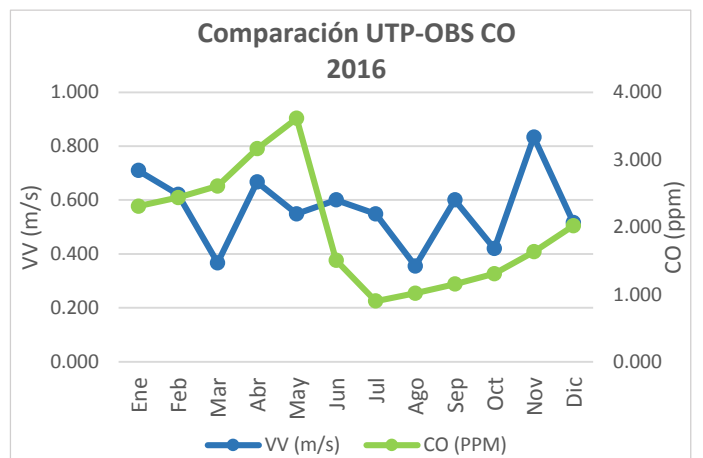
Gráfica 45 Comparación D de CO frente a VV en 2015
Fuente: Elaboración propia



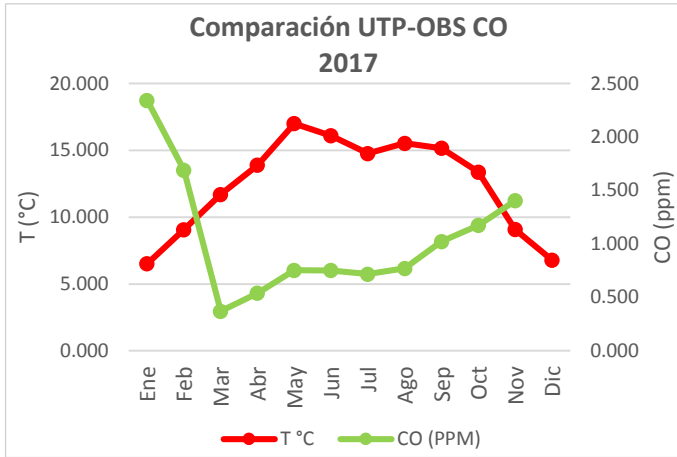
Gráfica 46 Comparación D de CO frente a T°C en 2016
Fuente: Elaboración propia



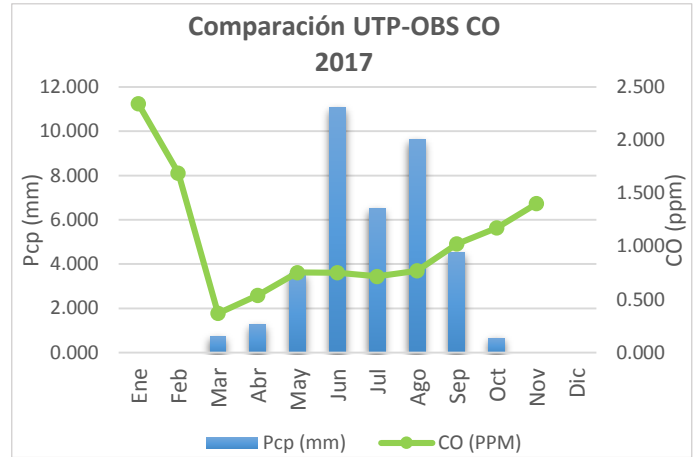
Gráfica 47 Comparación D de CO frente a Pcp en 2016
Fuente: Elaboración propia



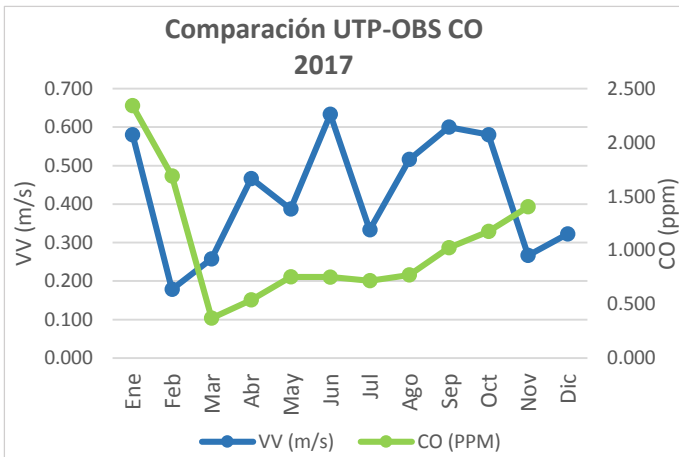
Gráfica 48 Comparación D de CO frente a VV en 2016
Fuente: Elaboración propia



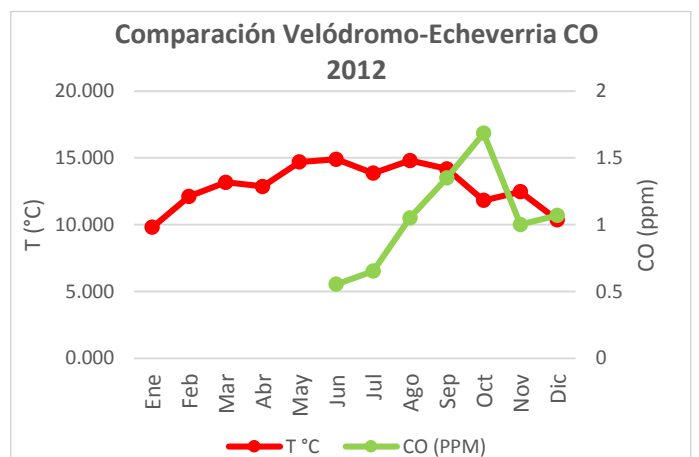
Gráfica 49 Comparación D de CO frente a T°C en 2017
Fuente: Elaboración propia



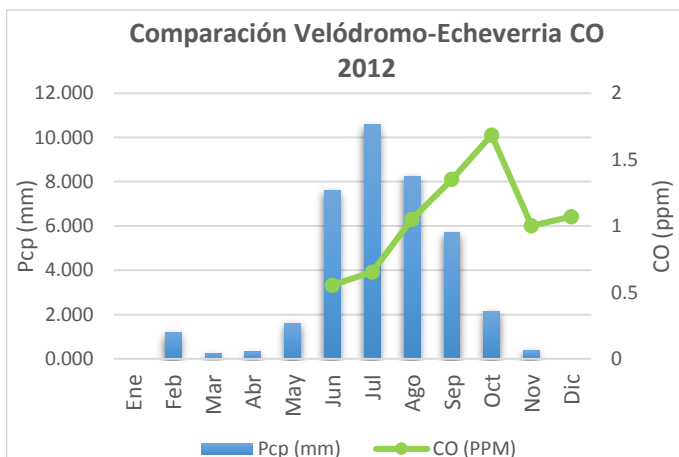
Gráfica 50 Comparación D de CO frente a Pcp en 2017
Fuente: Elaboración propia



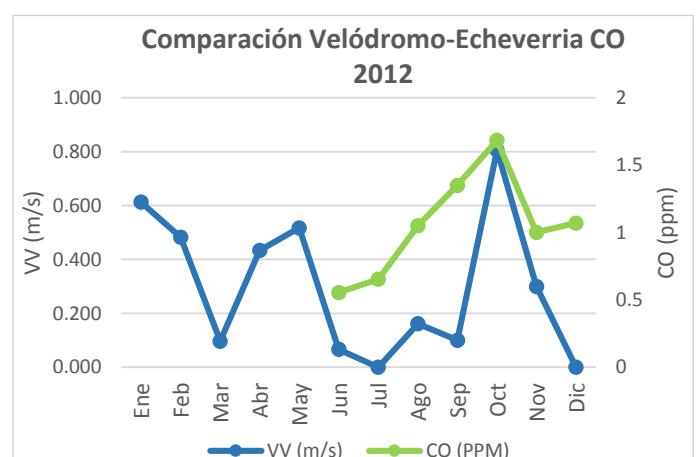
Gráfica 51 Comparación D de CO frente a VV en 2017
Fuente: Elaboración propia



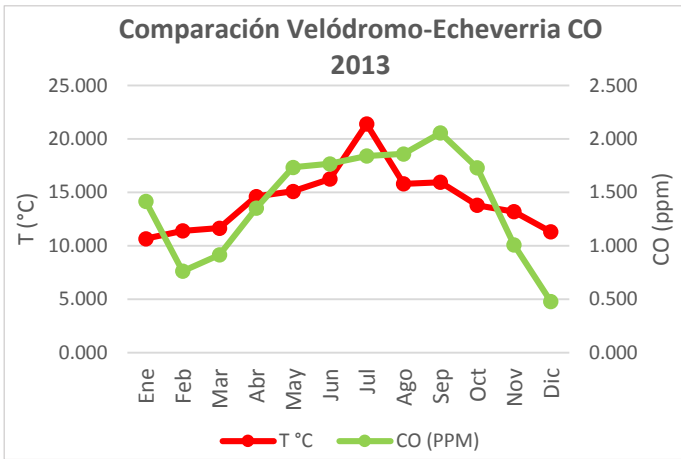
Gráfica 52 Comparación E de CO frente a T° C en 2012
Fuente: Elaboración propia



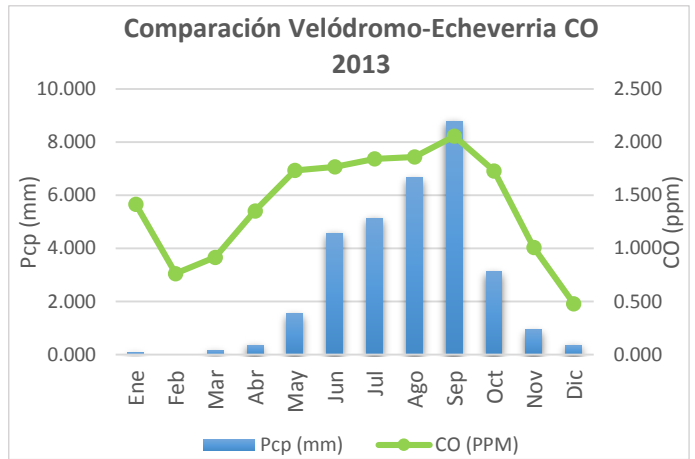
Gráfica 53 Comparación E de CO frente a Pcp en 2012
Fuente: Elaboración propia



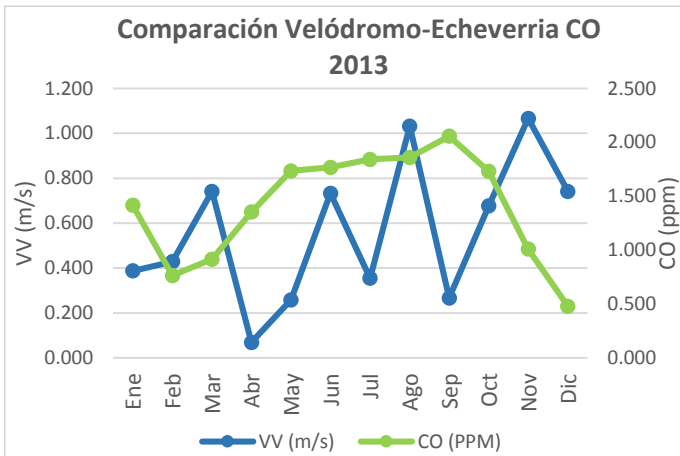
Gráfica 54 Comparación E de CO frente a VV en 2012
Fuente: Elaboración propia



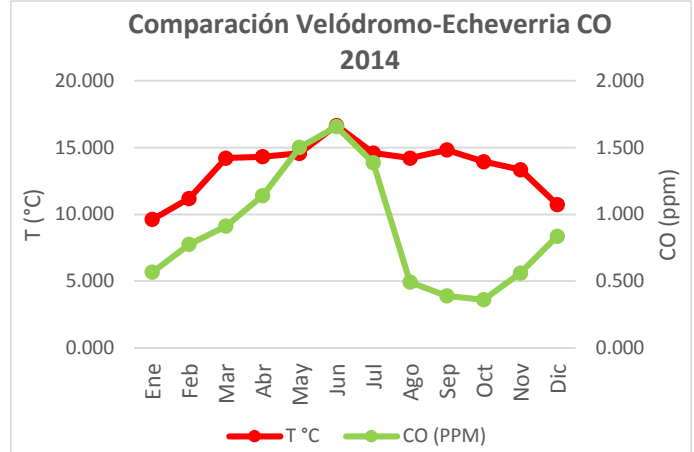
Gráfica 55 Comparación E de CO frente a T °C en 2013
Fuente: Elaboración propia



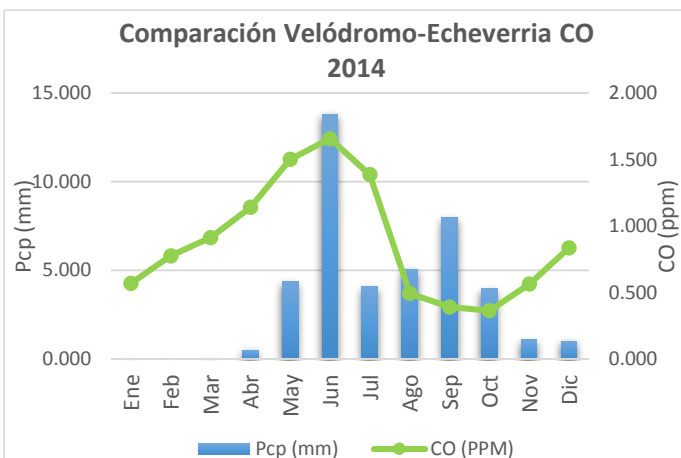
Gráfica 56 Comparación E de CO frente a Pcp en 2013
Fuente: Elaboración propia



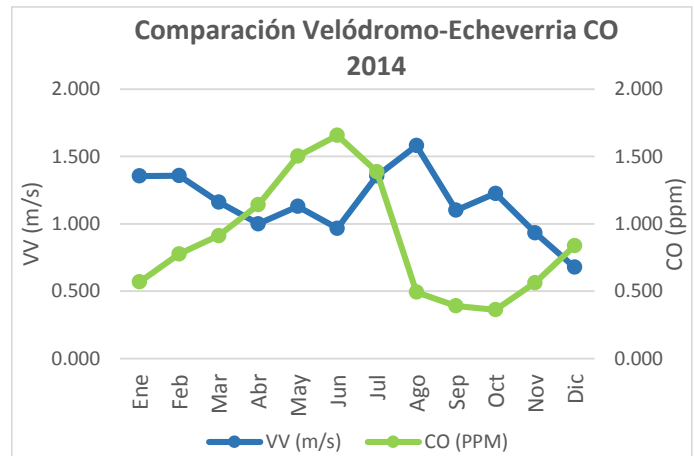
Gráfica 57 Comparación E de CO frente a VV en 2013
Fuente: Elaboración propia



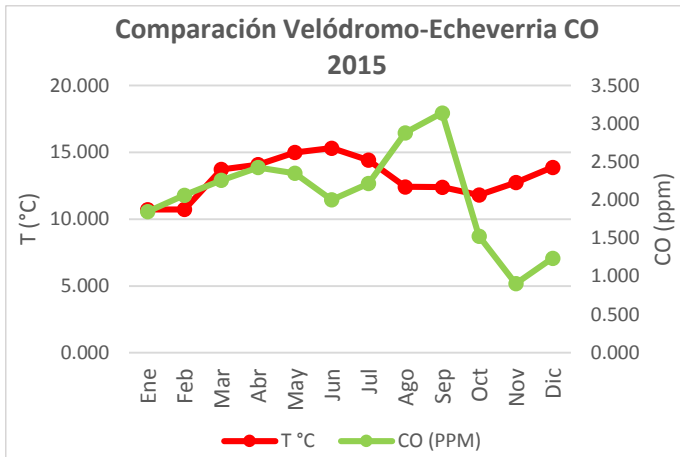
Gráfica 58 Comparación E de CO frente a T °C en 2014
Fuente: Elaboración propia



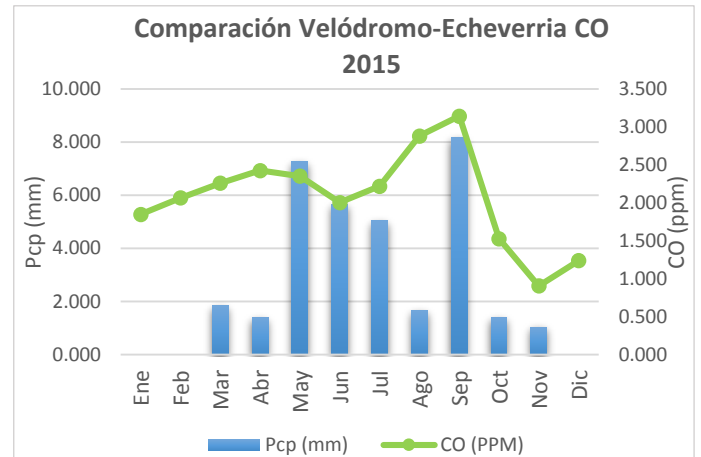
Gráfica 59 Comparación E de CO frente a Pcp en 2014
Fuente: Elaboración propia



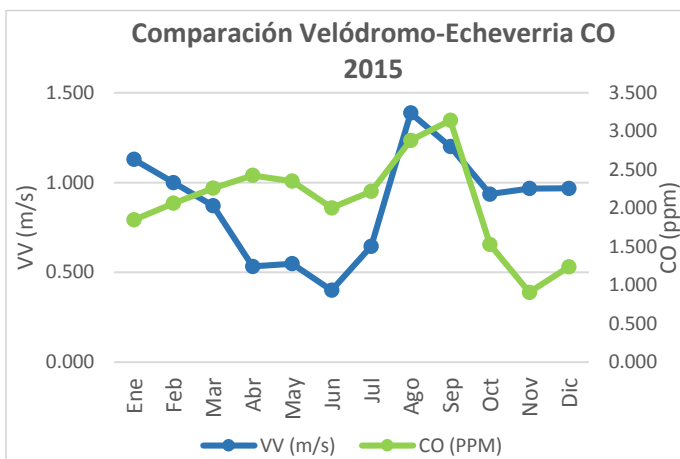
Gráfica 61 Comparación E de CO frente a VV en 2014
Fuente: Elaboración propia



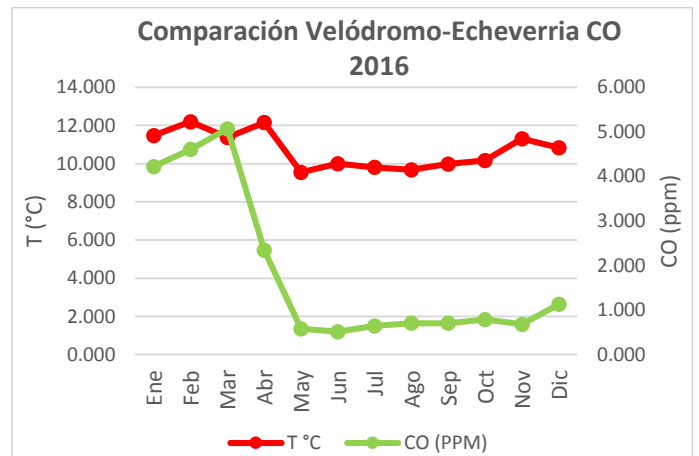
Gráfica 61 Comparación E de CO frente a T° C en 2015
Fuente: Elaboración propia



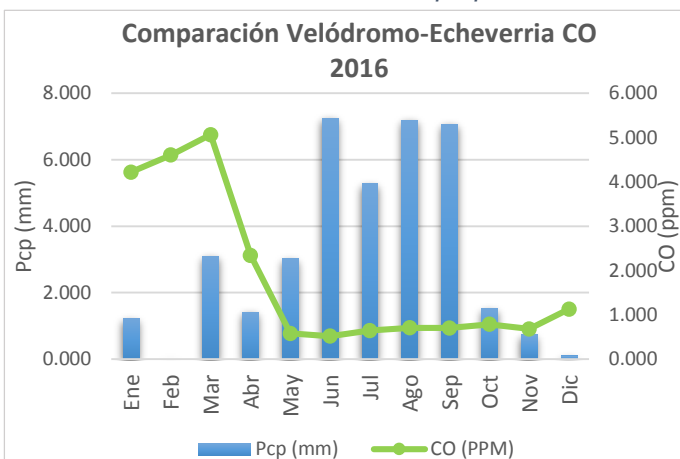
Gráfica 62 Comparación E de CO frente a Pcp en 2015
Fuente: Elaboración propia



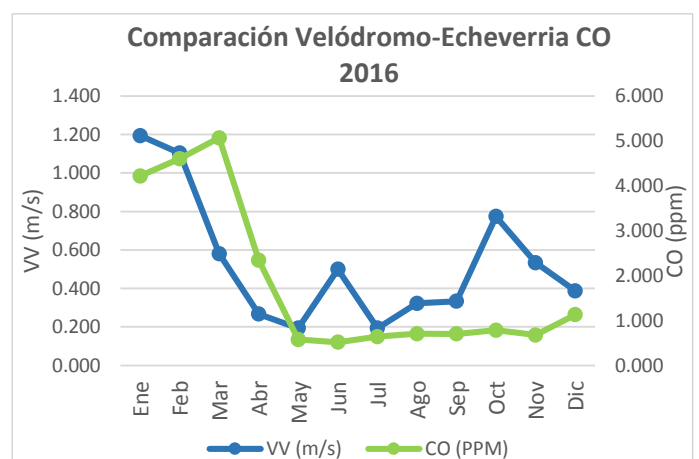
Gráfica 63 Comparación E de CO frente a VV en 2015
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 64 Comparación E de CO frente a T° C en 2016
Fuente: Elaboración propia

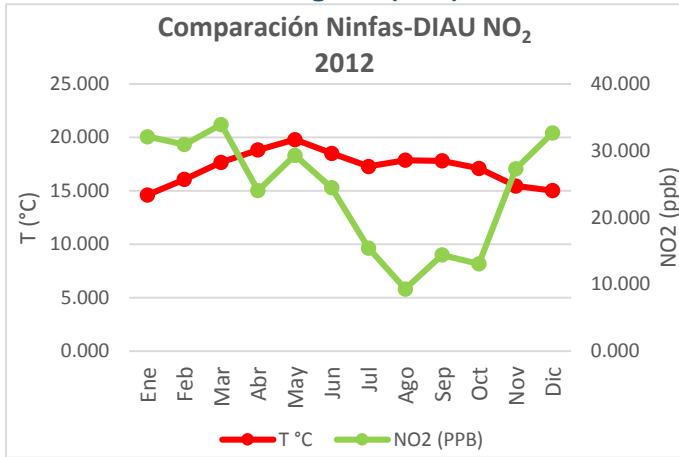


Gráfica 65 Comparación E de CO frente a Pcp en 2016
Fuente: Elaboración propia

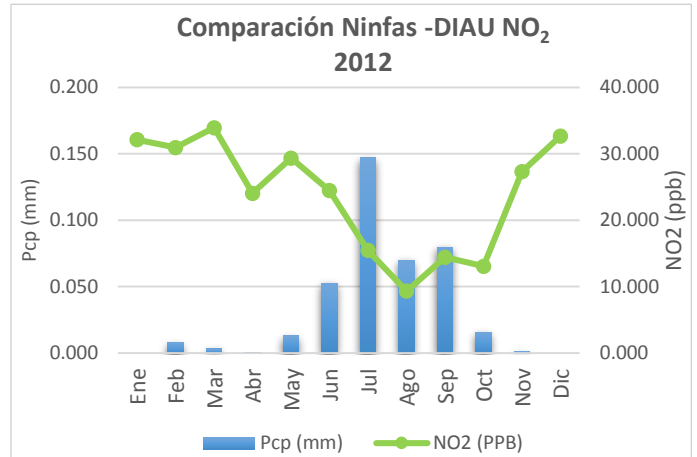


Gráfica 66 Comparación E de CO frente a VV en 2016
Fuente: Elaboración propia

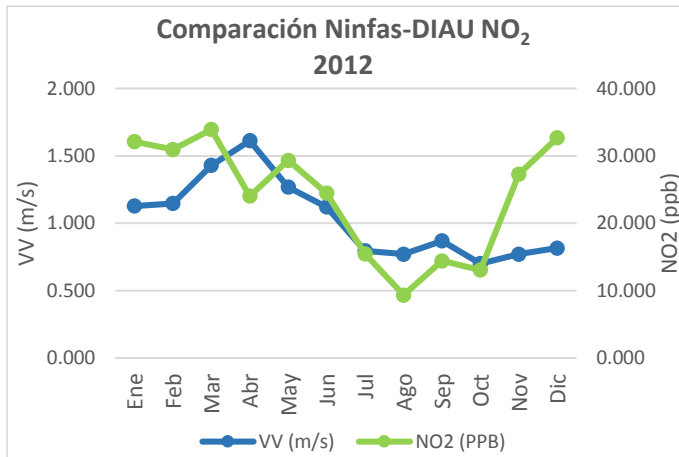
Dióxido de Nitrógeno (NO₂)



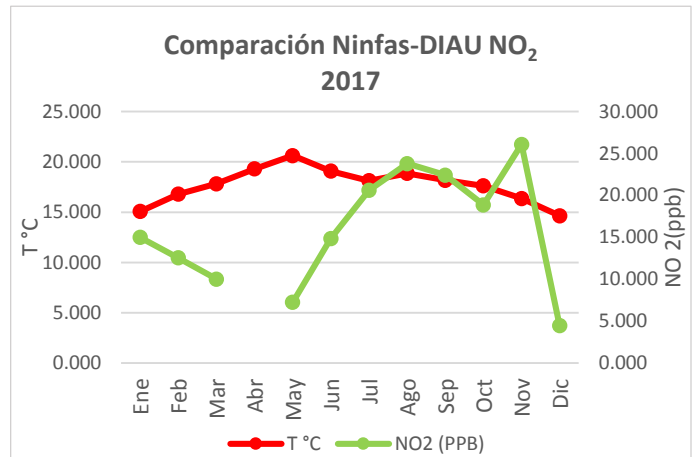
Gráfica 67 Comparación A de NO₂ frente a T° C en 2012
Fuente: Elaboración propia



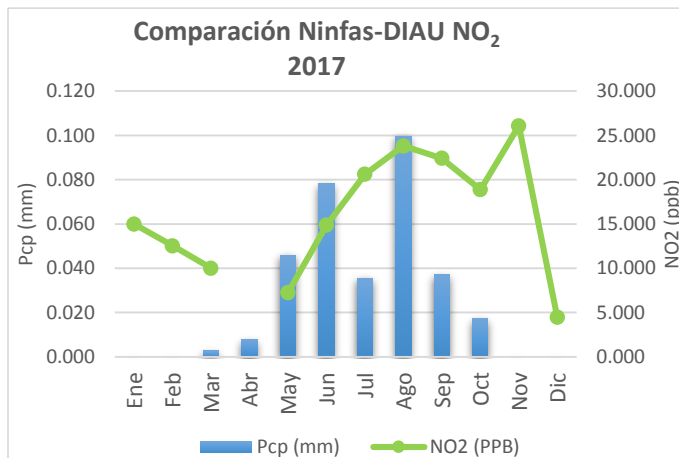
Gráfica 68 Comparación A de NO₂ frente a Pcp en 2012
Fuente: Elaboración propia



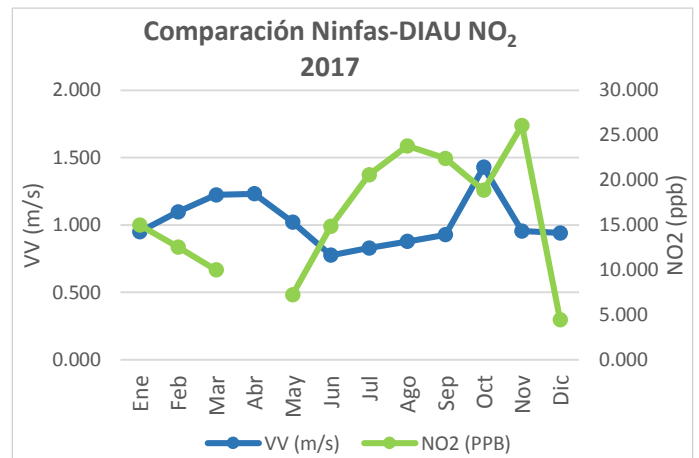
Gráfica 69 Comparación A de NO₂ frente a VV en 2012
Fuente: Elaboración propia



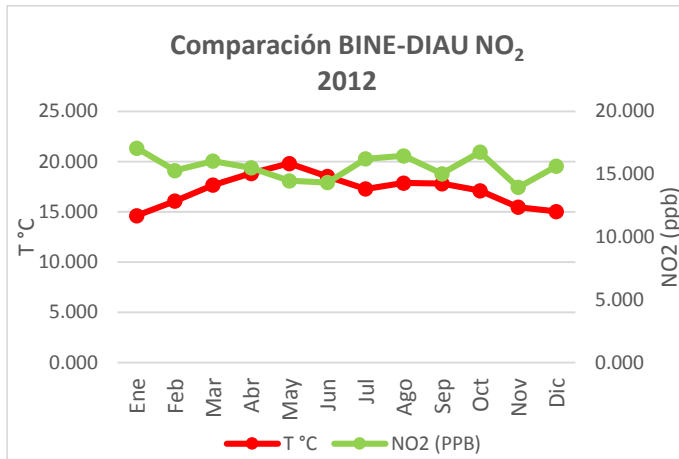
Gráfica 70 Comparación A de NO₂ frente a T° C en 2017
Fuente: Elaboración propia



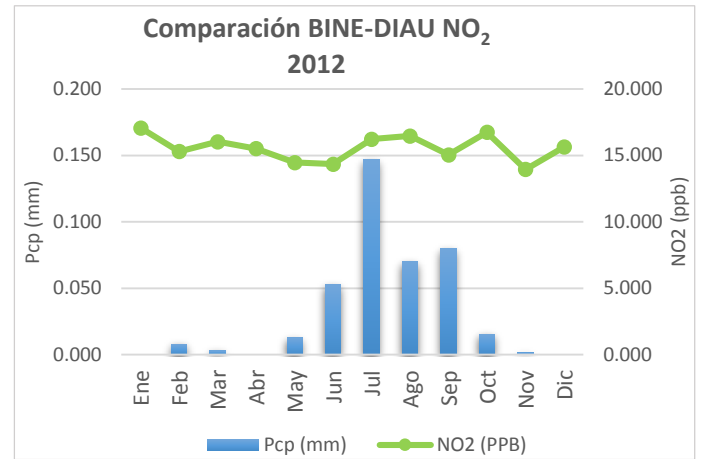
Gráfica 71 Comparación A de NO₂ frente a Pcp en 2017
Fuente: Elaboración propia



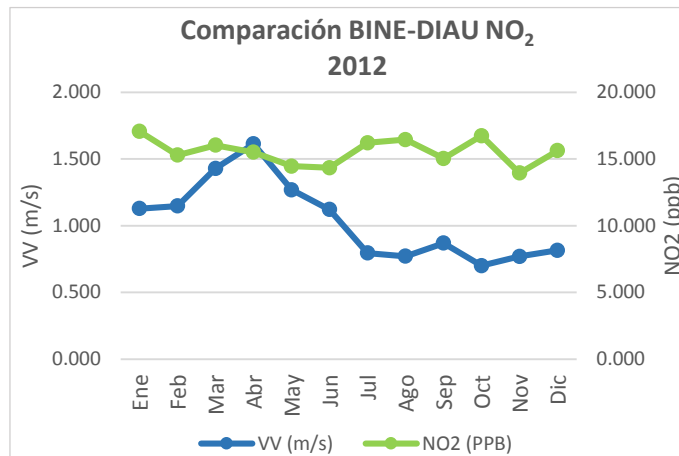
Gráfica 72 Comparación A de NO₂ frente a VV en 2017
Fuente: Elaboración propia



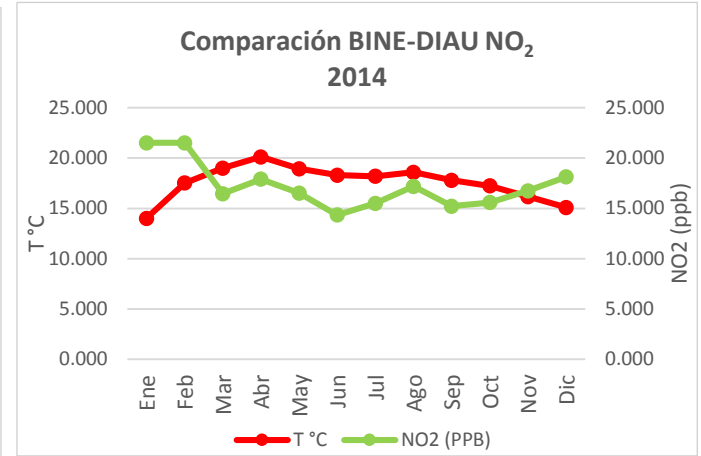
Gráfica 73 Comparación B de NO₂ frente a T °C en 2012
Fuente: Elaboración propia



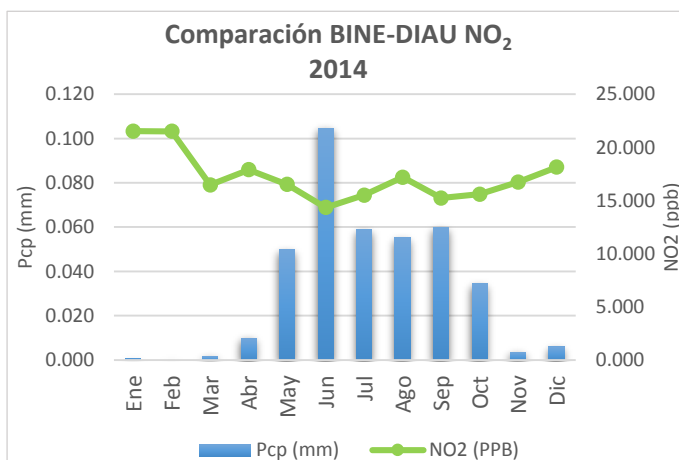
Gráfica 74 Comparación B de NO₂ frente a Pcp en 2012
Fuente: Elaboración propia



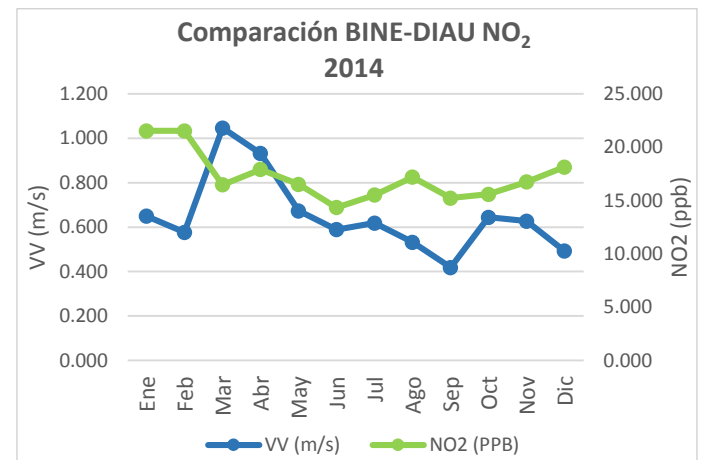
Gráfica 75 Comparación B de NO₂ frente a VV en 2012
Fuente: Elaboración propia



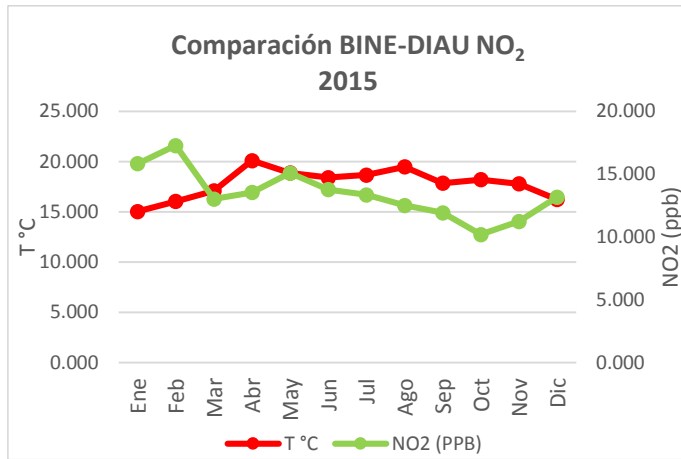
Gráfica 76 Comparación B de NO₂ frente a T °C en 2014
Fuente: Elaboración propia



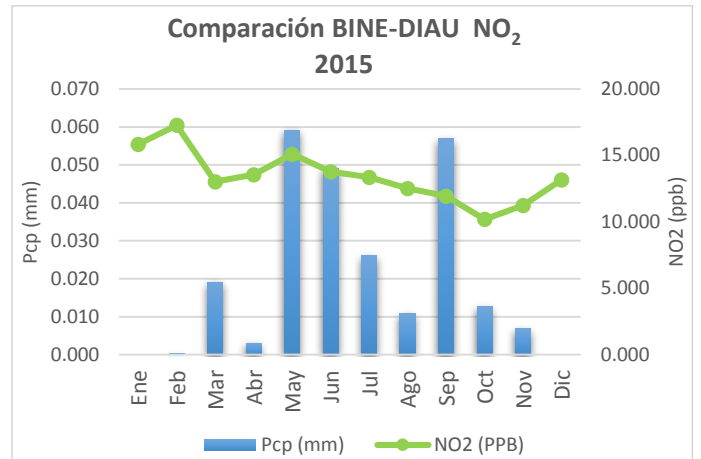
Gráfica 77 Comparación B de NO₂ frente a Pcp en 2014
Fuente: Elaboración propia



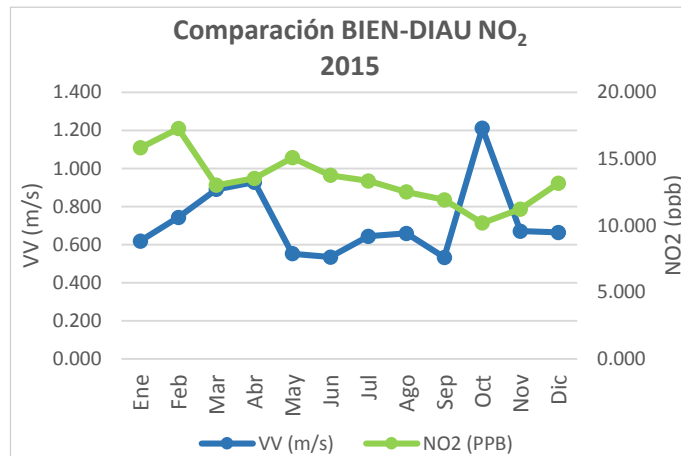
Gráfica 78 Comparación B de NO₂ frente a VV en 2014
Fuente: Elaboración propia



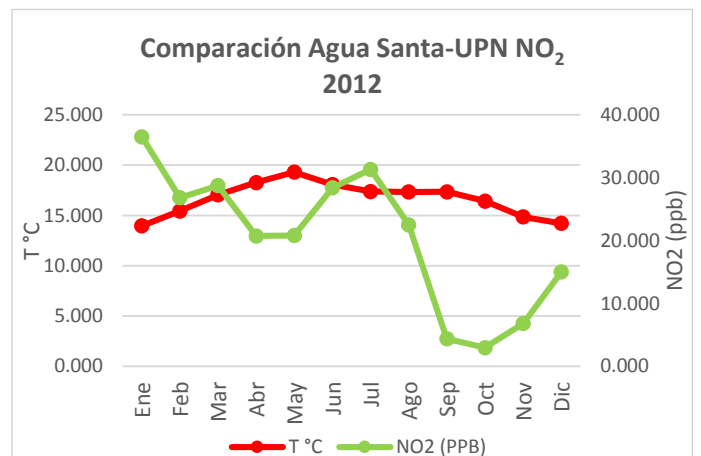
Gráfica 79 Comparación B de NO₂ frente a T° C en 2015
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 80 Comparación B de NO₂ frente a Pcp en 2015
Fuente: Elaboración propia



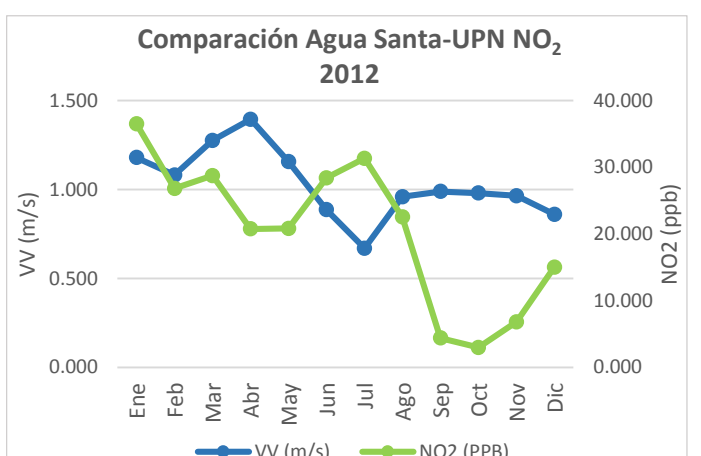
Gráfica 81 Comparación B de NO₂ frente a VV en 2015
Fuente: Elaboración propia



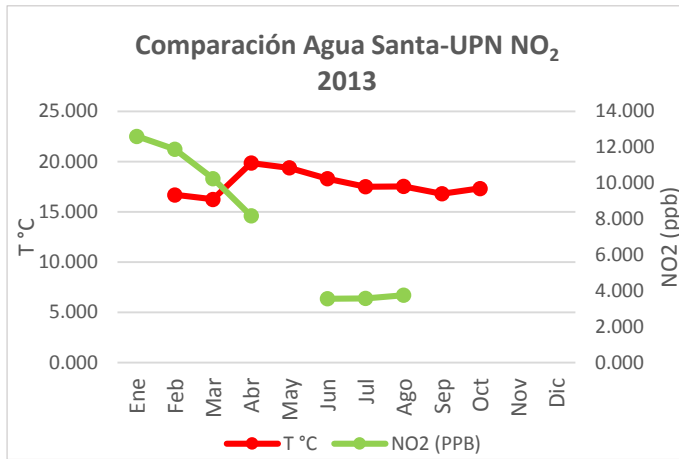
Gráfica 82 Comparación C de NO₂ frente a T° C en 2012
Fuente: Elaboración propia



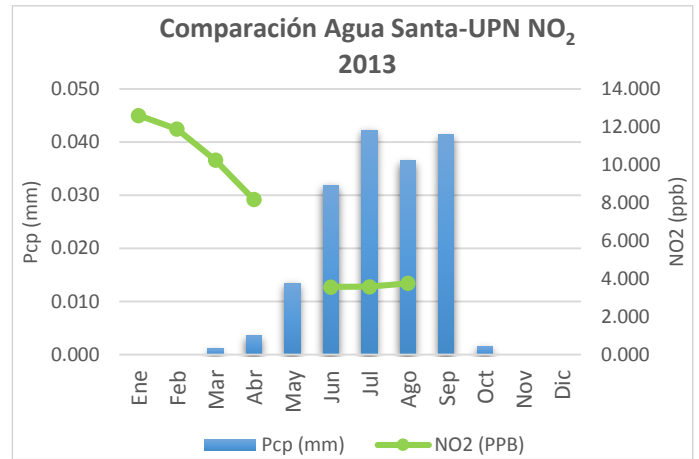
Gráfica 83 Comparación C de NO₂ frente a Pcp en 2012
Fuente: Elaboración propia



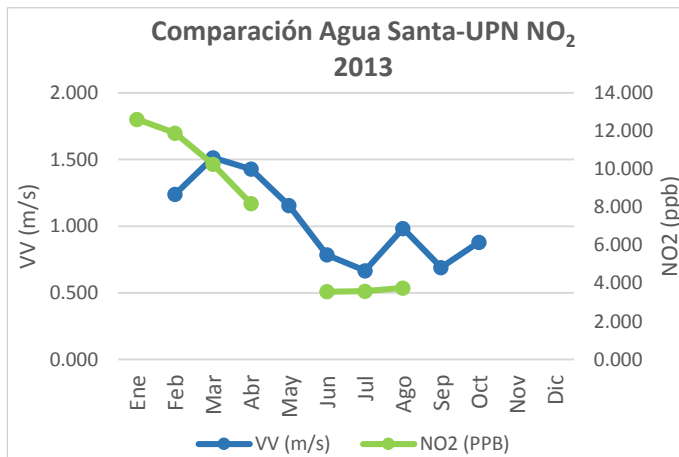
Gráfica 84 Comparación C de NO₂ frente a VV en 2012
Fuente: Elaboración propia



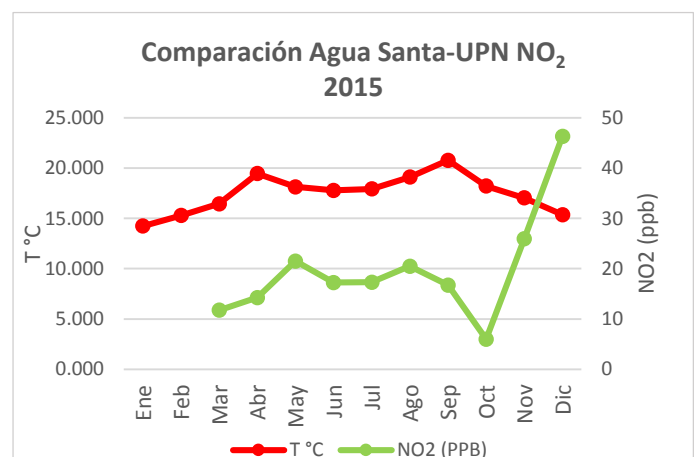
Gráfica 85 Comparación C de NO₂ frente a T°C en 2013
Fuente: Elaboración propia



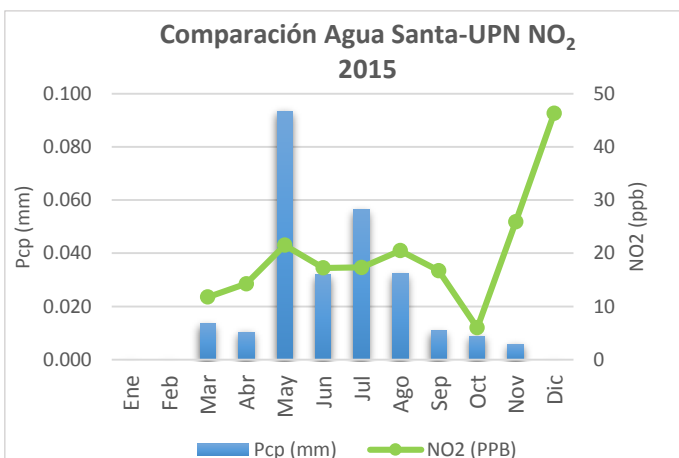
Gráfica 86 Comparación C de NO₂ frente a Pcp en 2013
Fuente: Elaboración propia



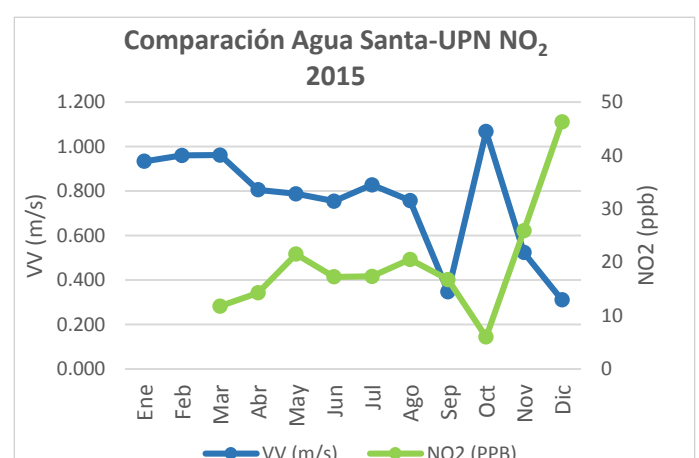
Gráfica 87 Comparación C de NO₂ frente a VV en 2013
Fuente: Elaboración propia



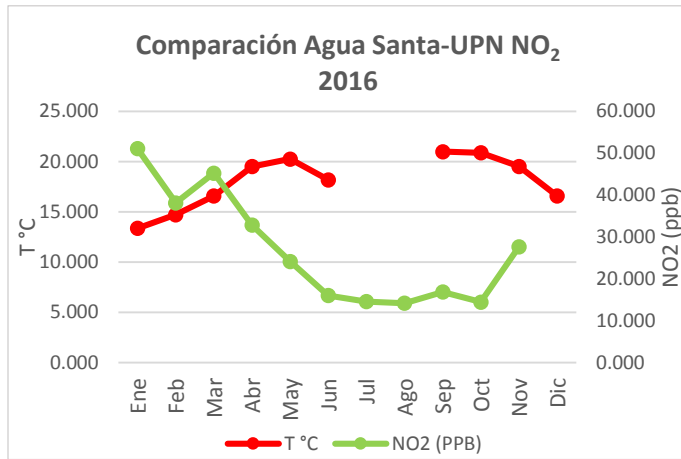
Gráfica 88 Comparación C de NO₂ frente a T°C en 2015
Fuente: Elaboración propia



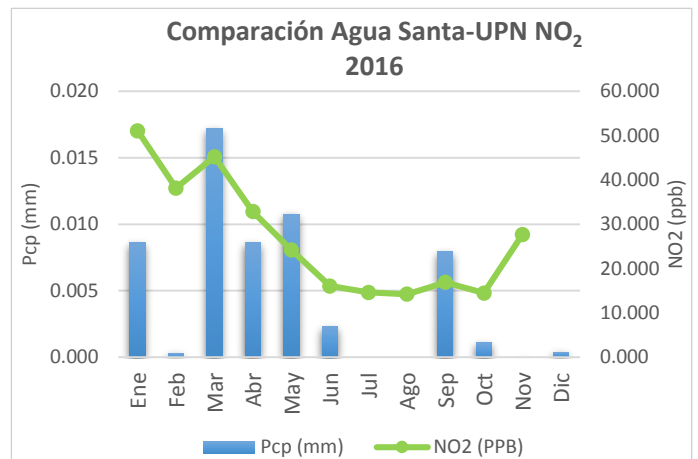
Gráfica 89 Comparación C de NO₂ frente a Pcp en 2015
Fuente: Elaboración propia



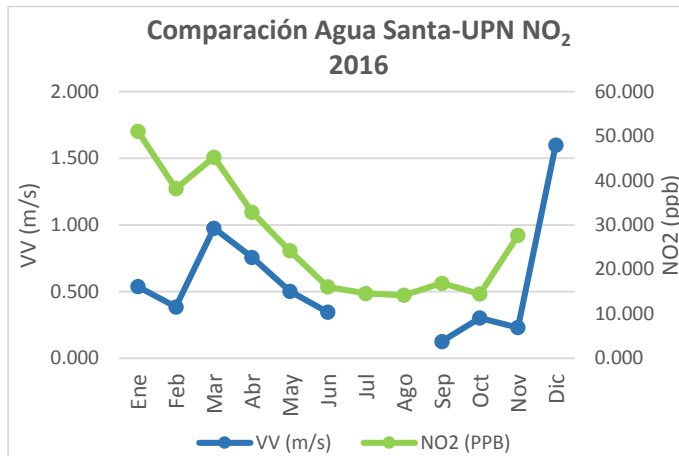
Gráfica 90 Comparación C de NO₂ frente a VV en 2015
Fuente: Elaboración propia



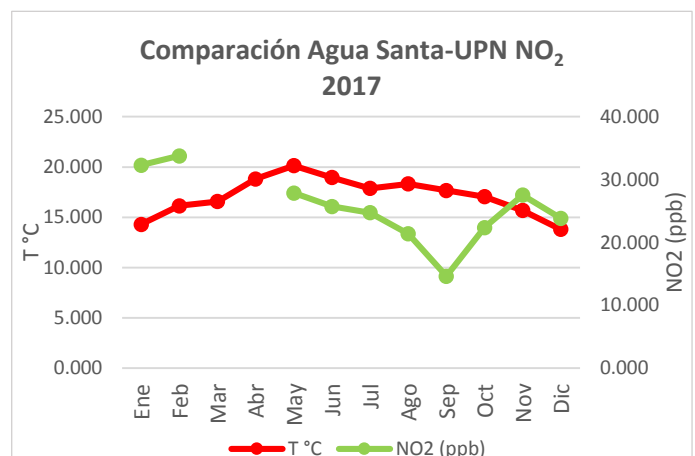
Gráfica 91 Comparación C de NO₂ frente a T °C en 2016
Fuente: Elaboración propia



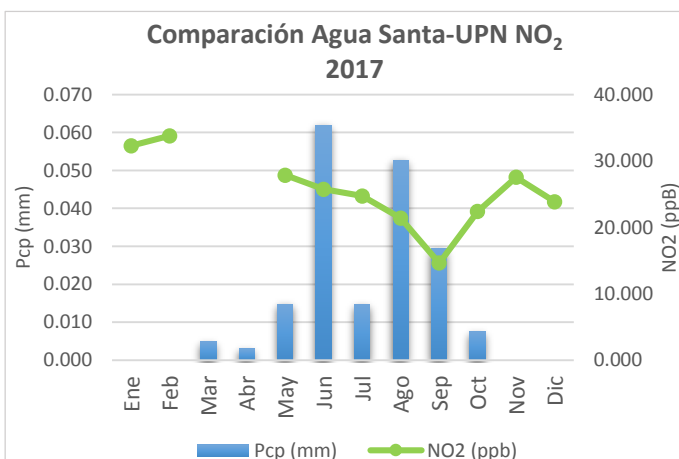
Gráfica 92 Comparación C de NO₂ frente a Pcp en 2016
Fuente: Elaboración propia



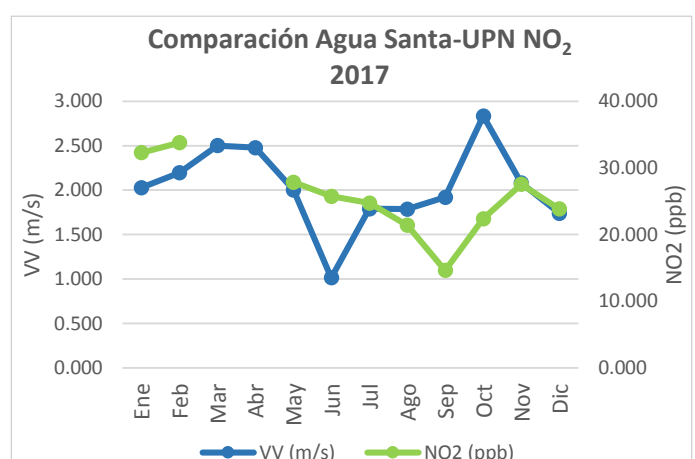
Gráfica 93 Comparación C de NO₂ frente a VV en 2016
Fuente: Elaboración propia



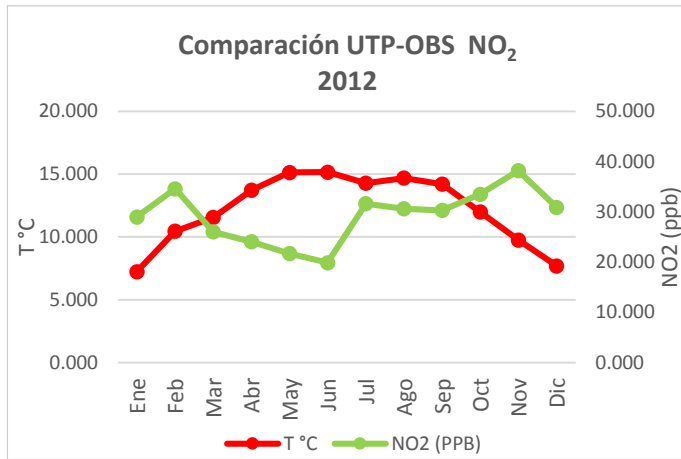
Gráfica 94 Comparación C de NO₂ frente a T °C en 2017
Fuente: Elaboración propia



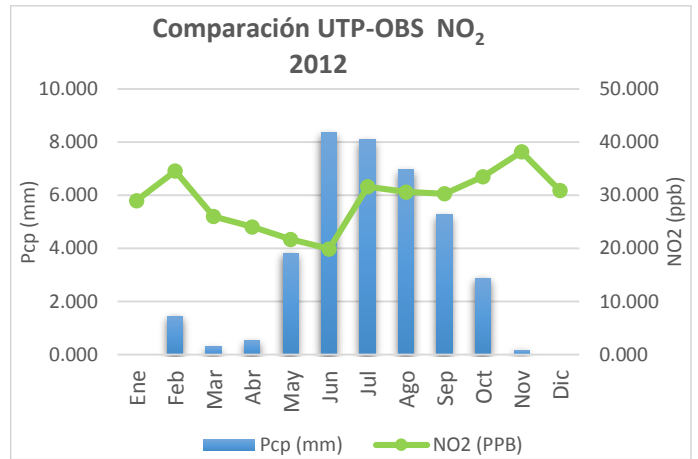
Gráfica 95 Comparación C de NO₂ frente a Pcp en 2017
Fuente: Elaboración propia



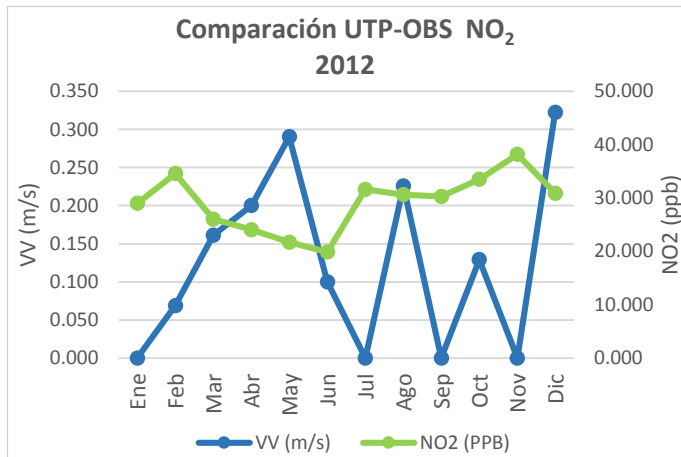
Gráfica 96 Comparación C de NO₂ frente a VV en 2017
Fuente: Elaboración propia



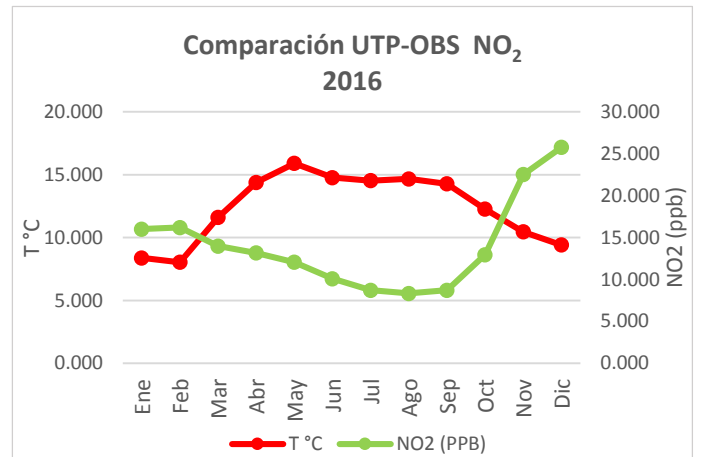
Gráfica 97 Comparación D de NO₂ frente a T°C en 2012
Fuente: Elaboración propia



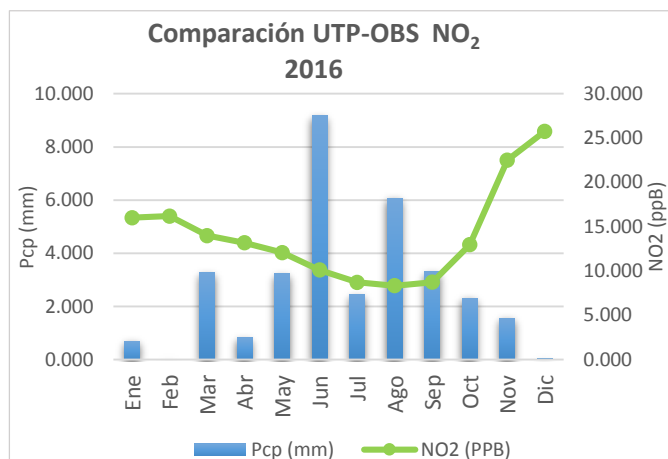
Gráfica 98 Comparación D de NO₂ frente a Pcp en 2012
Fuente: Elaboración propia



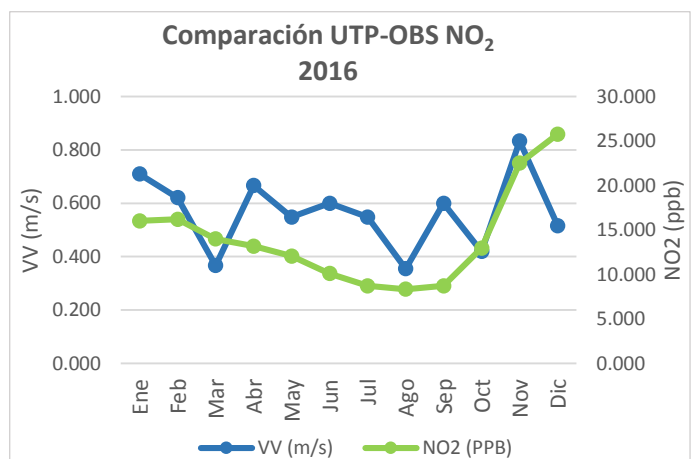
Gráfica 99 Comparación D de NO₂ frente a VV en 2012
Fuente: Elaboración propia



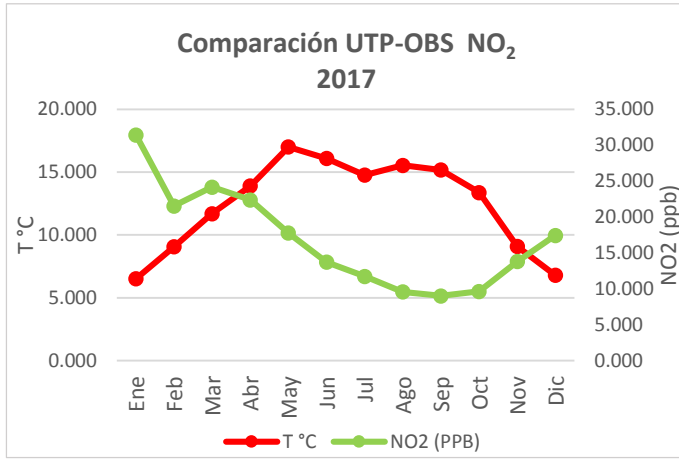
Gráfica 100 Comparación D de NO₂ frente a T°C en 2016
Fuente: Elaboración propia



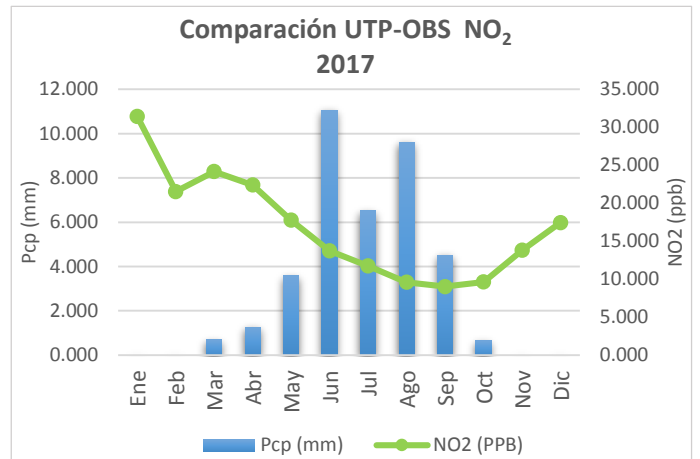
Gráfica 101 Comparación D de NO₂ frente a Pcp 2016
Fuente: Elaboración propia



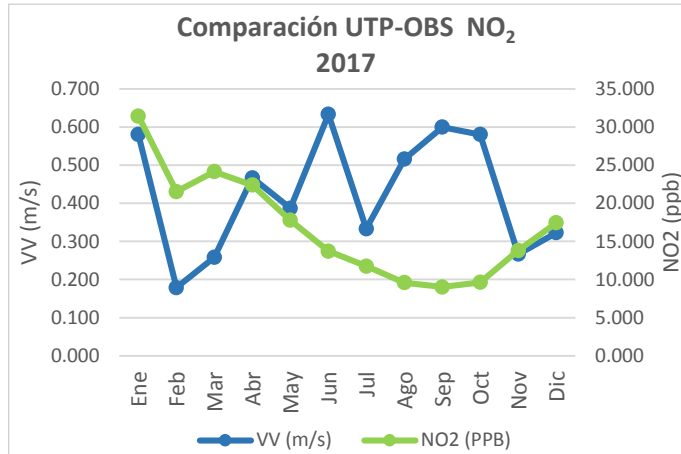
Gráfica 102 Comparación D de NO₂ frente a T°C 2016
Fuente: Elaboración propia



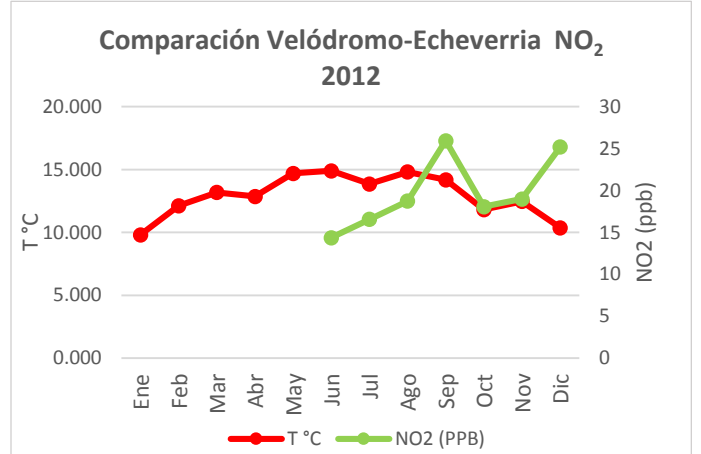
Gráfica 103 Comparación D de NO₂ frente a T°C 2017
Fuente: Elaboración propia



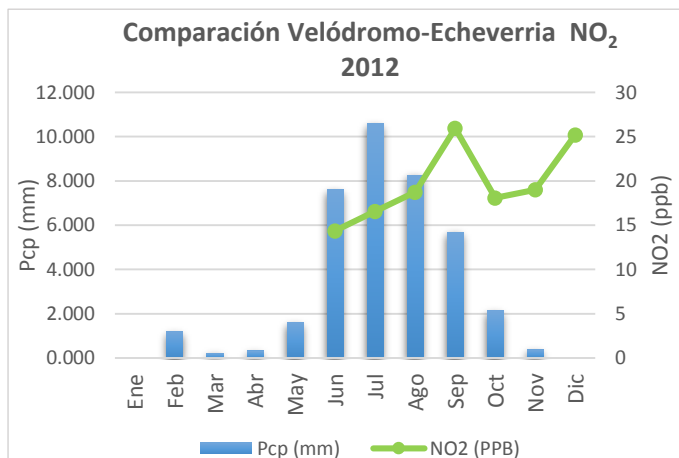
Gráfica 104 Comparación D de NO₂ frente a Pcp 2017
Fuente: Elaboración propia



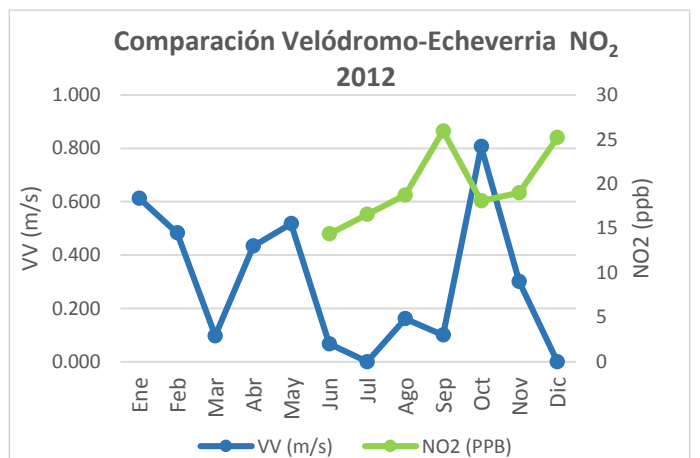
Gráfica 105 Comparación D de NO₂ frente a VV 2017
Fuente: Elaboración propia



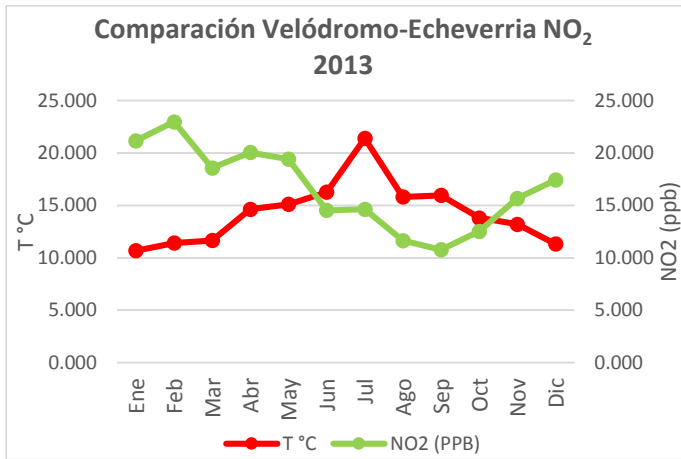
Gráfica 106 Comparación E de NO₂ frente a T°C 2012
Fuente: Elaboración propia



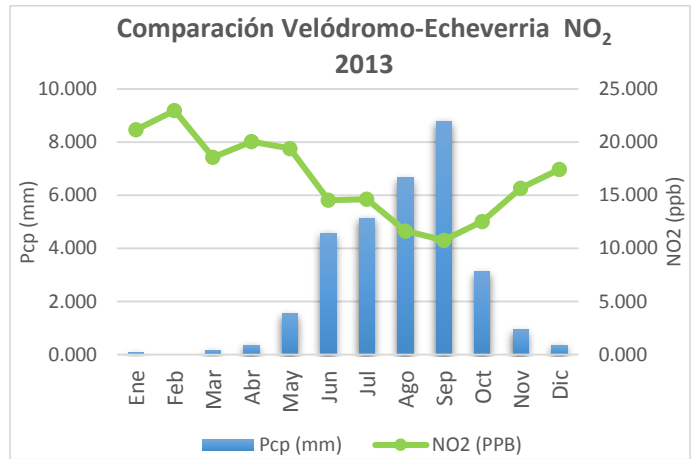
Gráfica 107 Comparación E de NO₂ frente a Pcp 2012
Fuente: Elaboración propia



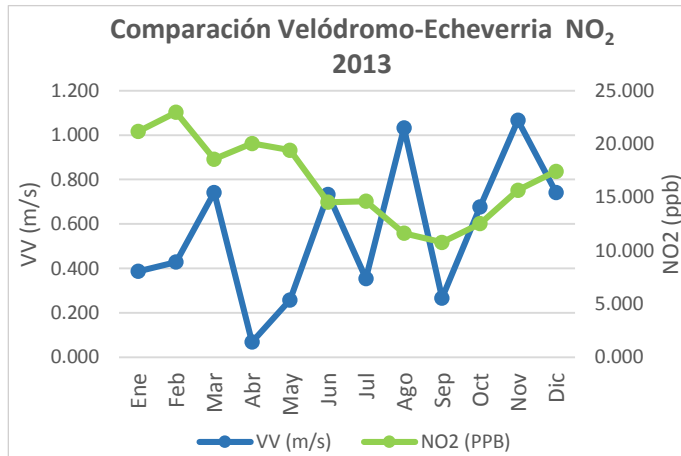
Gráfica 108 Comparación E de NO₂ frente a VV 2012
Fuente: Elaboración propia



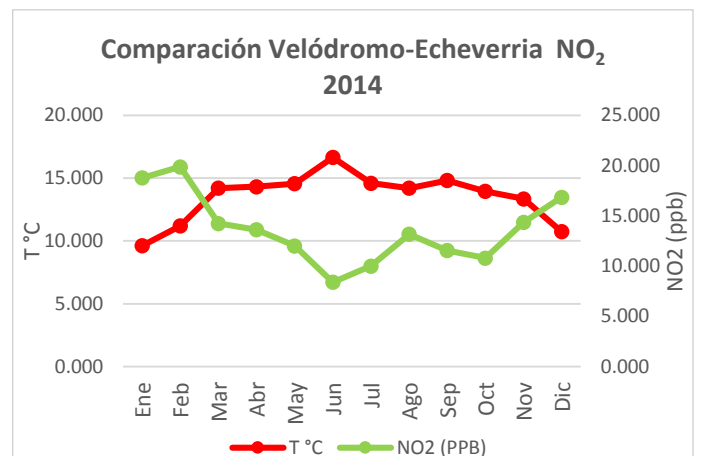
Gráfica 109 Comparación E de NO₂ frente a T°C 2013
Fuente: Elaboración propia



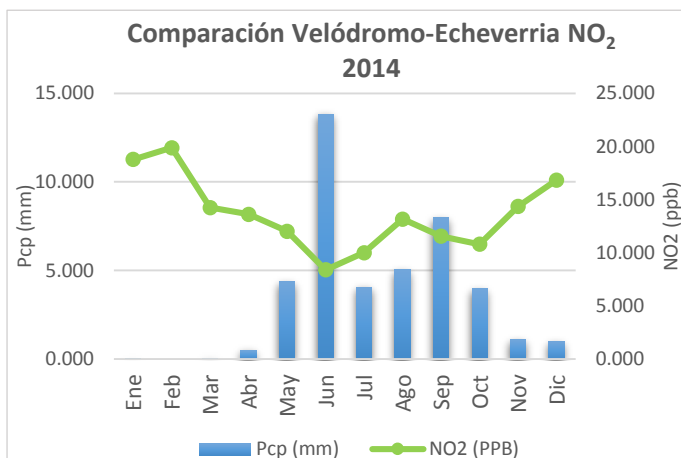
Gráfica 110 Comparación E de NO₂ frente a Pcp 2013
Fuente: Elaboración propia



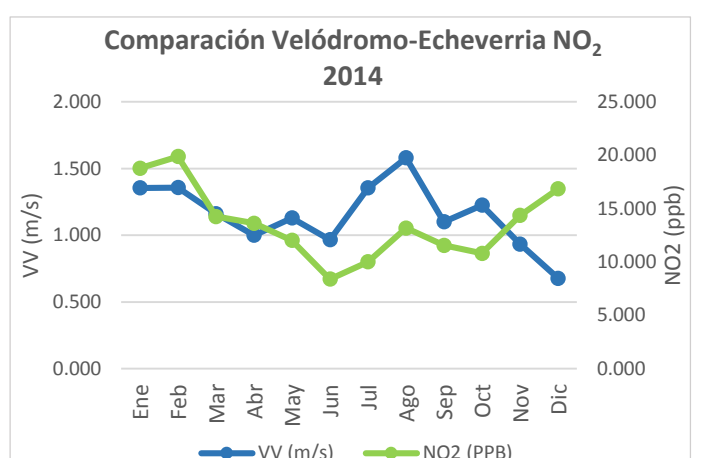
Gráfica 111 Comparación E de NO₂ frente a VV 2013
Fuente: Elaboración propia



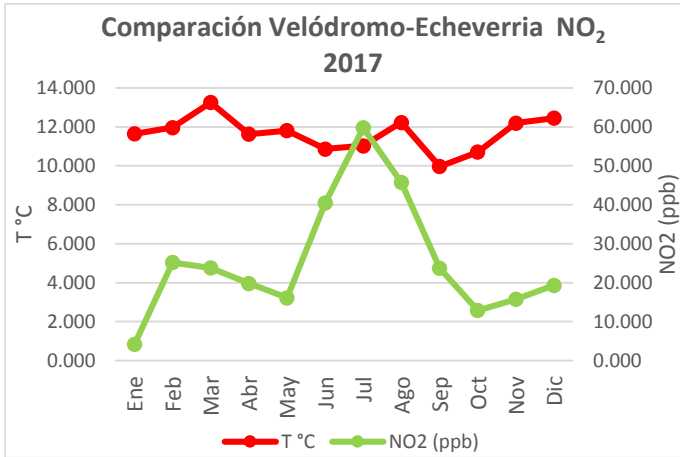
Gráfica 112 Comparación E de NO₂ frente a T°C 2014
Fuente: Elaboración propia



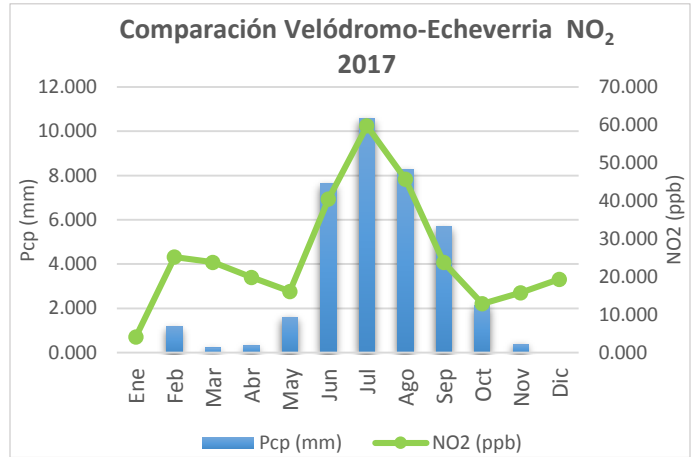
Gráfica 113 Comparación E de NO₂ frente a Pcp 2014
Fuente: Elaboración propia



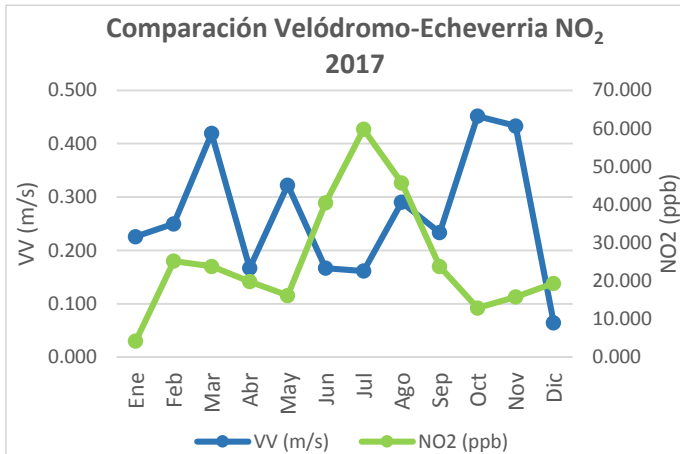
Gráfica 114 Comparación E de NO₂ frente a VV 2014
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 115 Comparación E de NO₂ frente a T°C 2017
Fuente: Elaboración propia

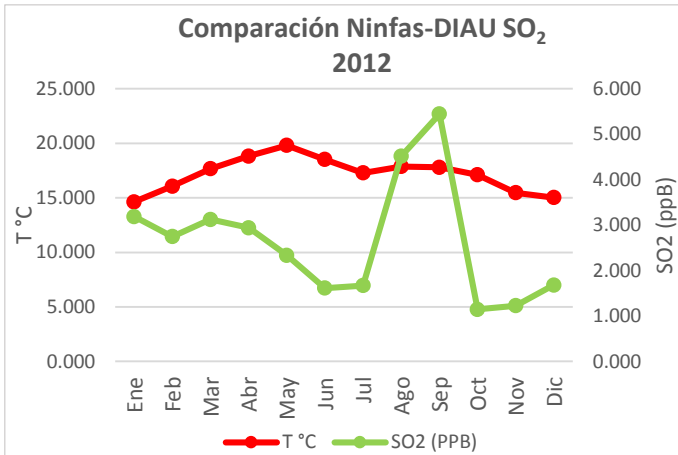


Gráfica 116 Comparación E de NO₂ frente a Pcp 2017
Fuente: Elaboración propia

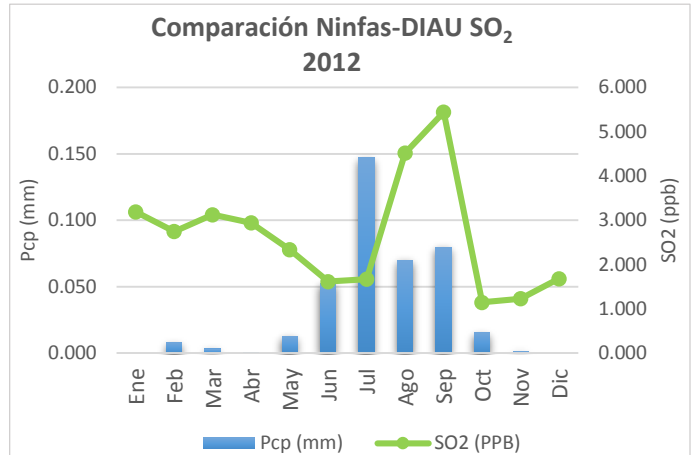


Gráfica 117 Comparación E de NO₂ frente a VV 2017
Fuente: Elaboración propia

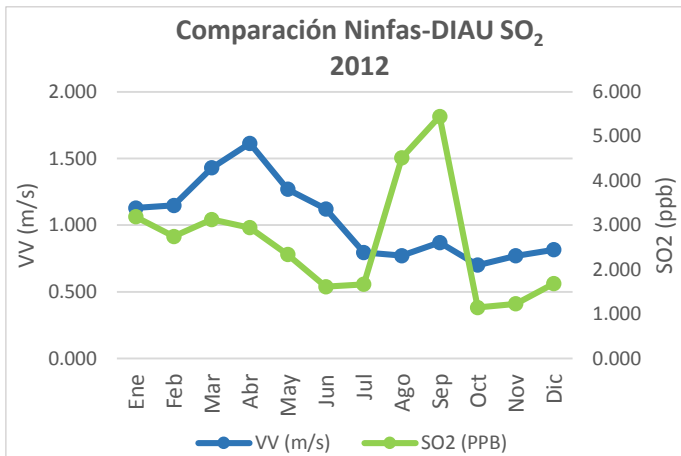
Dióxido de Azufre (SO₂)



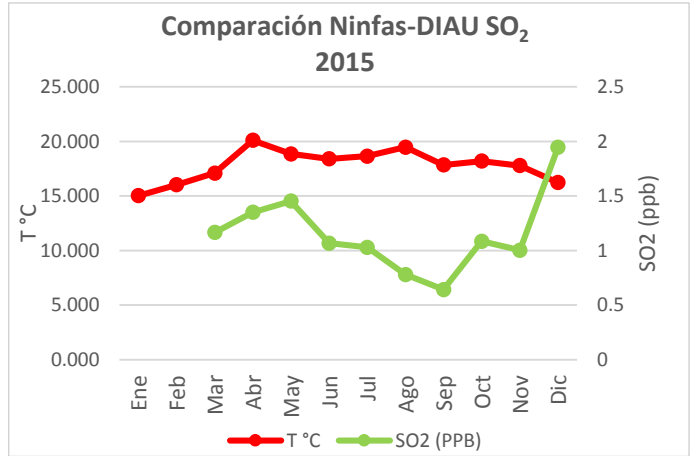
Gráfica 118 Comparación A de SO₂ frente a T°C 2012
Fuente: Elaboración propia



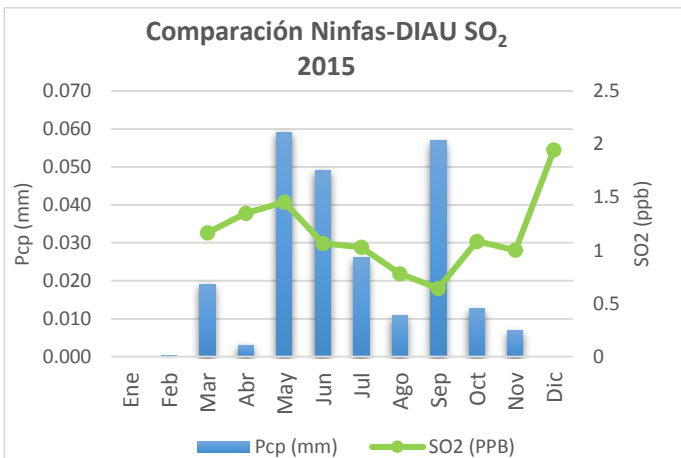
Gráfica 119 Comparación A de SO₂ frente a Pcp 2012
Fuente: Elaboración propia



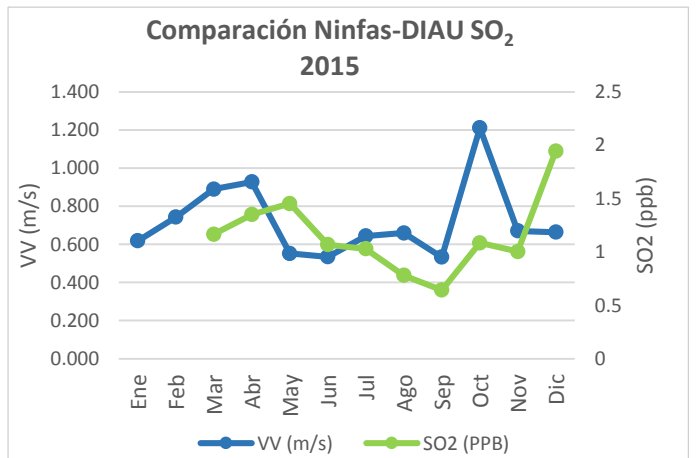
Gráfica 120 Comparación A de SO₂ frente a VV 2012
Fuente: Elaboración propia



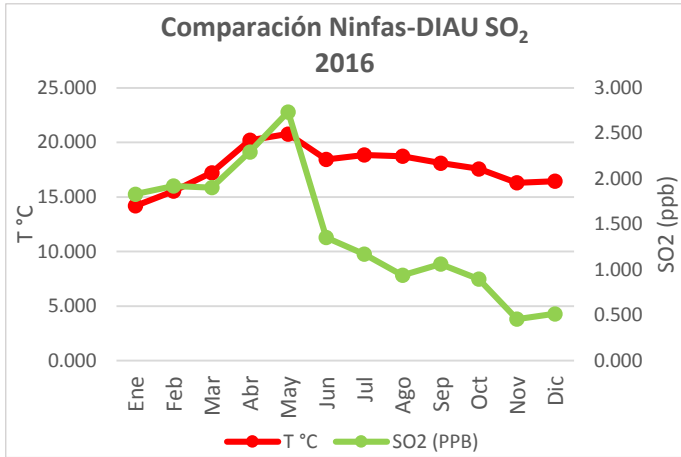
Gráfica 121 Comparación A de SO₂ frente a T°C 2015
Fuente: Elaboración propia



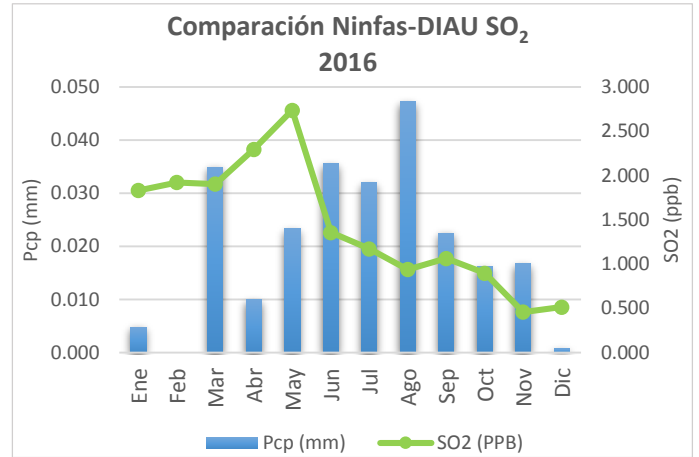
Gráfica 122 Comparación A de SO₂ frente a Pcp 2015
Fuente: Elaboración propia



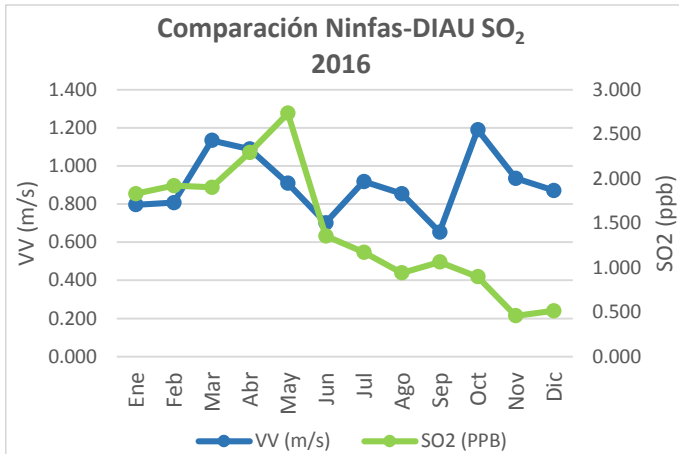
Gráfica 123 Comparación A de SO₂ frente a T°C 2012
Fuente: Elaboración propia



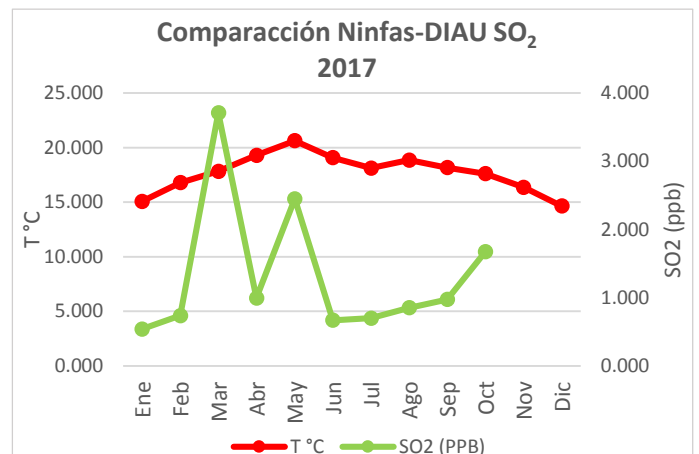
Gráfica 124 Comparación A de SO₂ frente a T°C 2016
Fuente: Elaboración propia



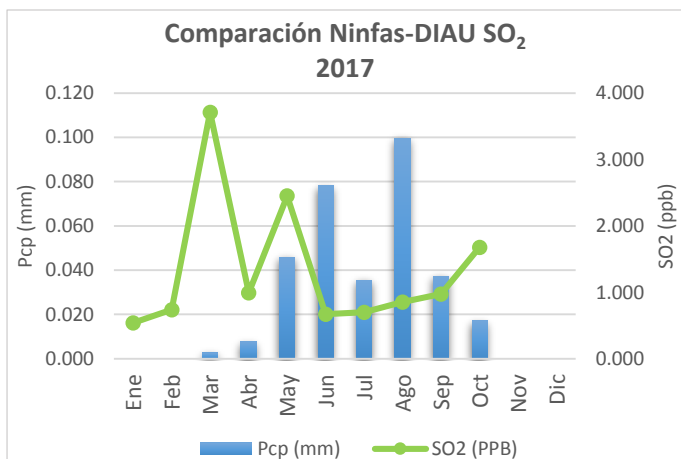
Gráfica 125 Comparación A de SO₂ frente a Pcp 2016
Fuente: Elaboración propia



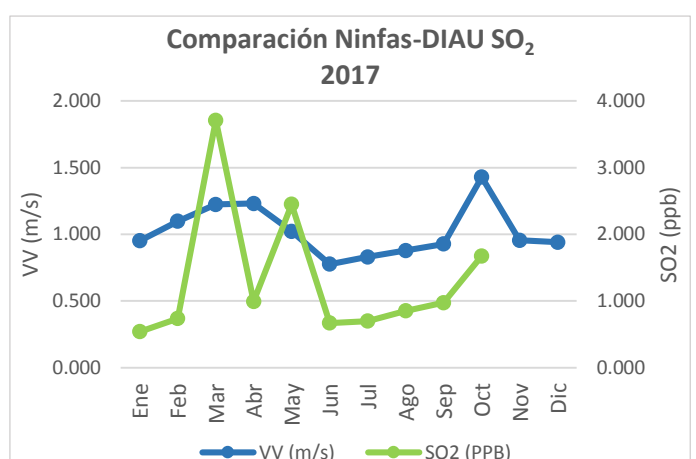
Gráfica 126 Comparación A de SO₂ frente a VV 2016
Fuente: Elaboración propia



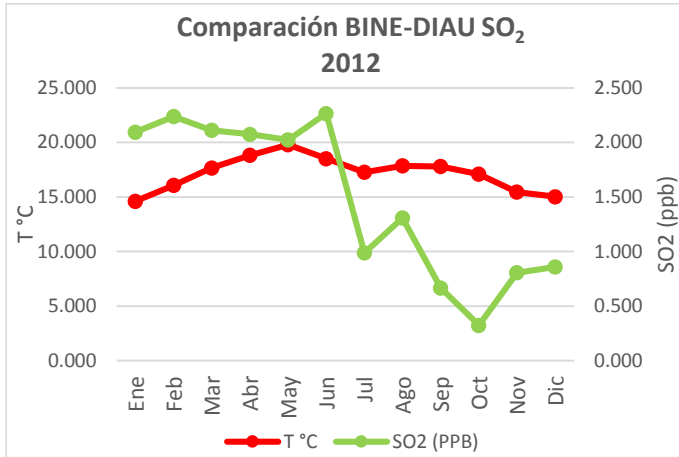
Gráfica 127 Comparación A de SO₂ frente a T°C 2017
Fuente: Elaboración propia



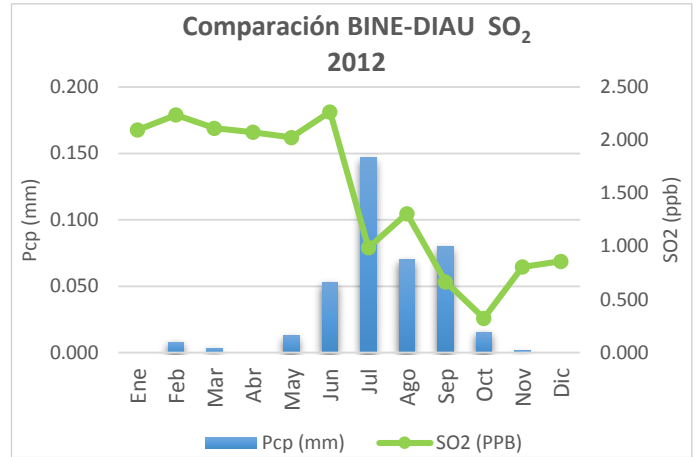
Gráfica 128 Comparación A de SO₂ frente a Pcp 2017
Fuente: Elaboración propia



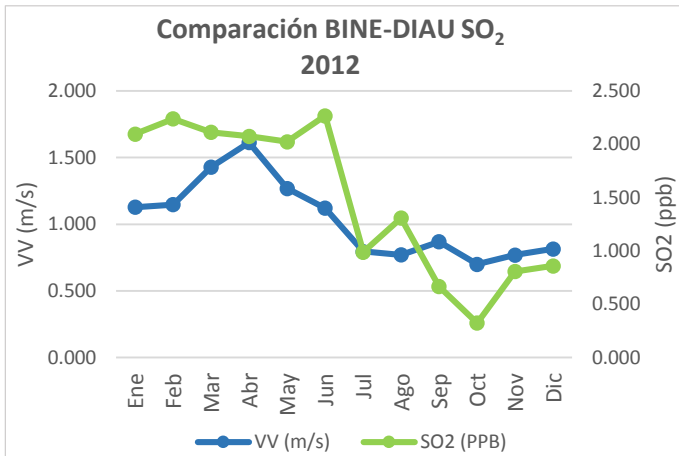
Gráfica 129 Comparación A de SO₂ frente a VV 2017
Fuente: Elaboración propia



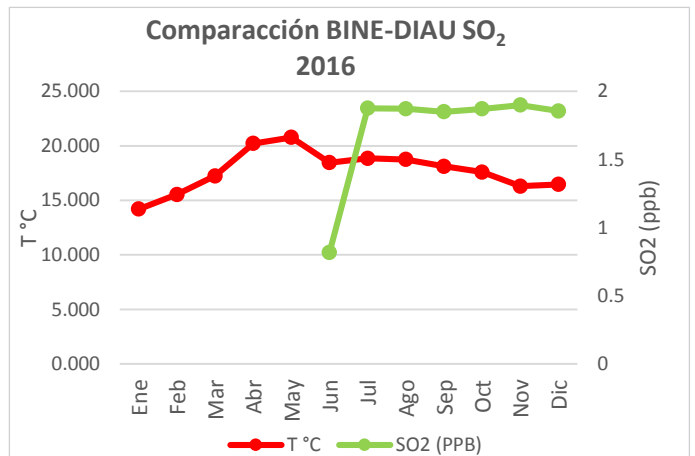
Gráfica 130 Comparación B de SO₂ frente a T°C 2012
Fuente: Elaboración propia



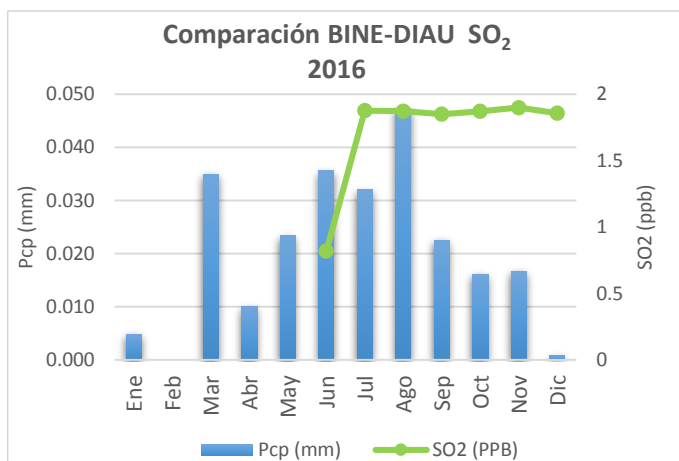
Gráfica 131 Comparación B de SO₂ frente a Pcp 2012
Fuente: Elaboración propia



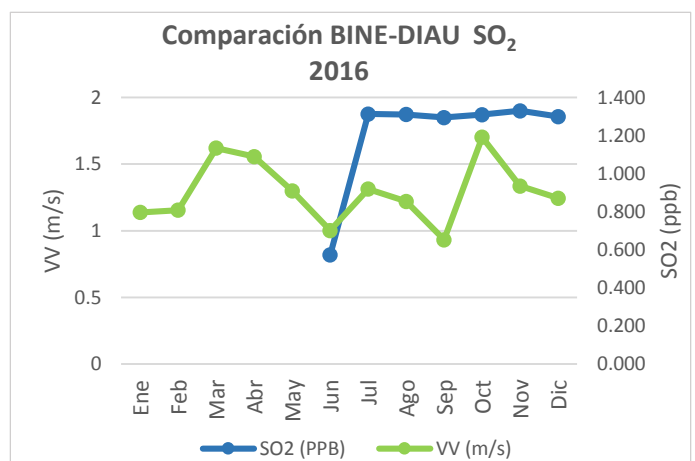
Gráfica 132 Comparación B de SO₂ frente a VV 2012
Fuente: Elaboración propia



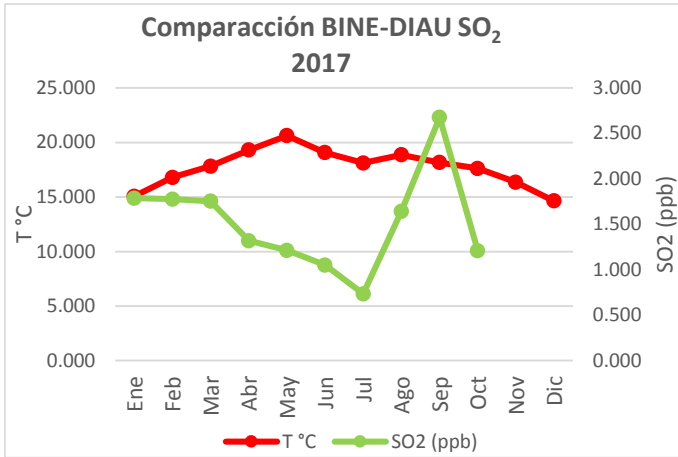
Gráfica 133 Comparación B de SO₂ frente a T°C 2016
Fuente: Elaboración propia



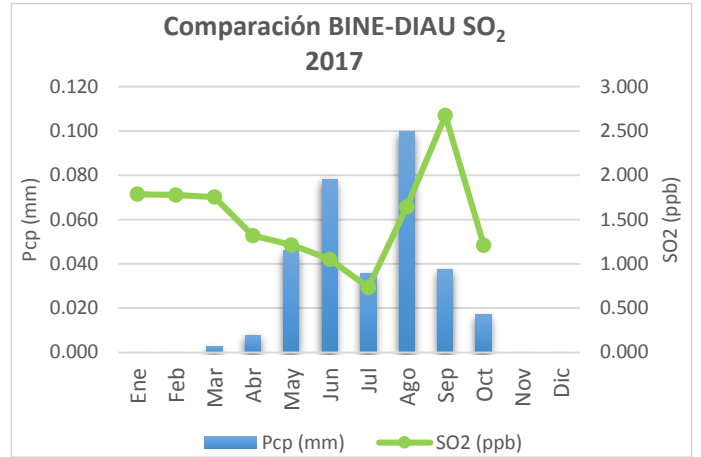
Gráfica 134 Comparación B de SO₂ frente a Pcp 2016
Fuente: Elaboración propia



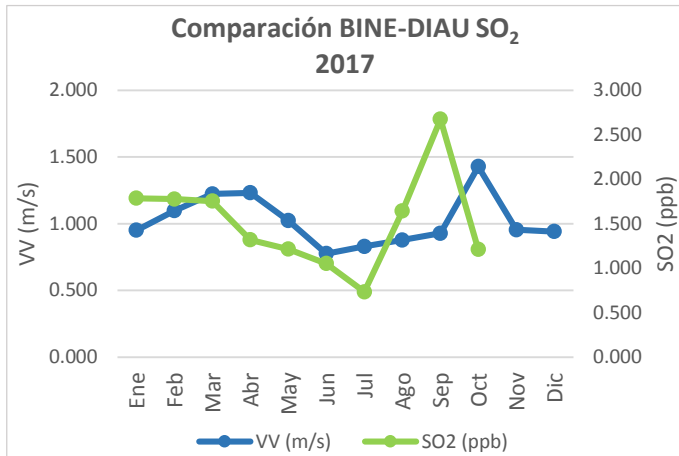
Gráfica 135 Comparación B de SO₂ frente a VV 2016
Fuente: Elaboración propia



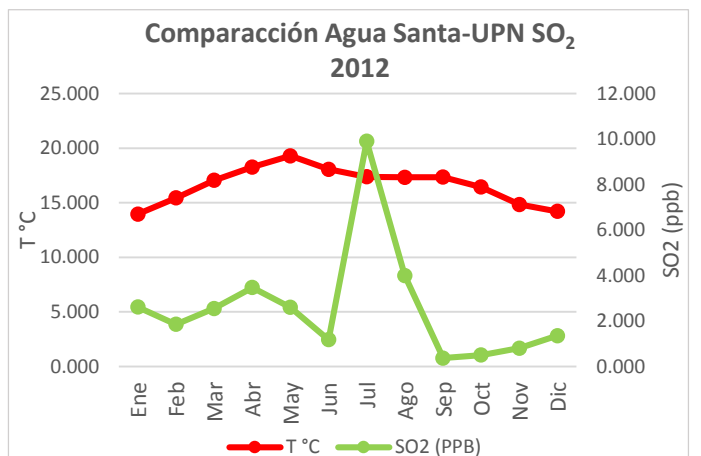
Gráfica 136 Comparación B de SO₂ frente a T°C 2017
Fuente: Elaboración propia



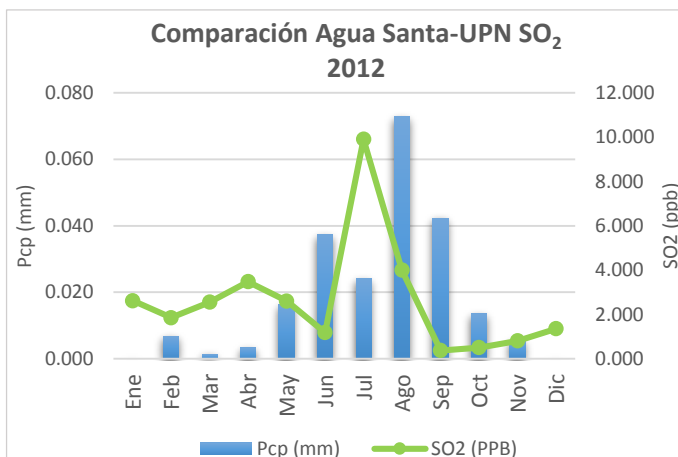
Gráfica 137 Comparación B de SO₂ frente a Pcp 2017
Fuente: Elaboración propia



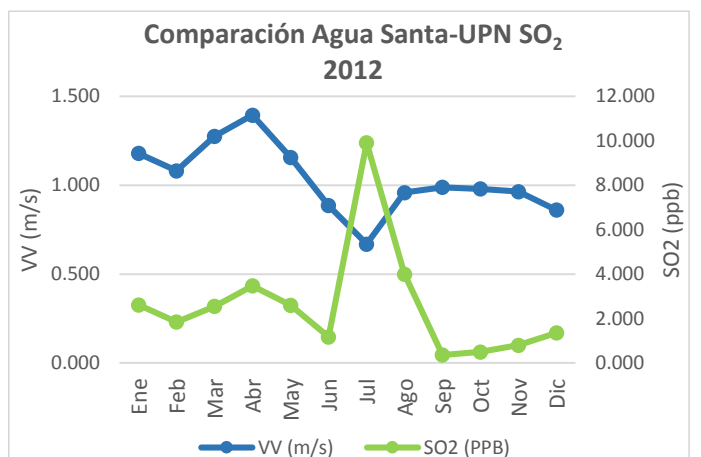
Gráfica 138 Comparación B de SO₂ frente a VV 2017
Fuente: Elaboración propia



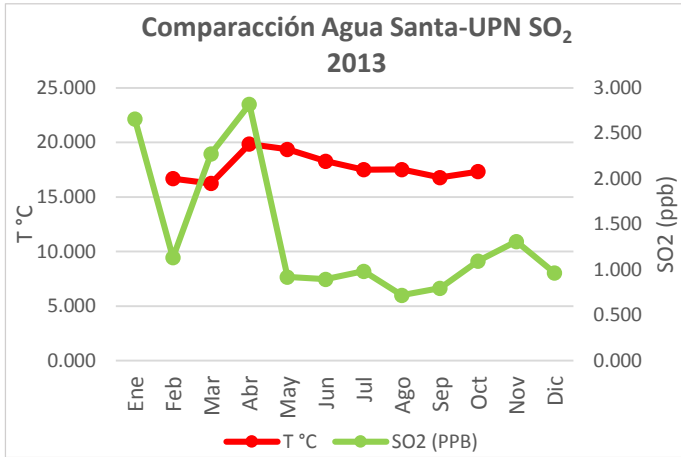
Gráfica 139 Comparación C de SO₂ frente a T°C 2012
Fuente: Elaboración propia



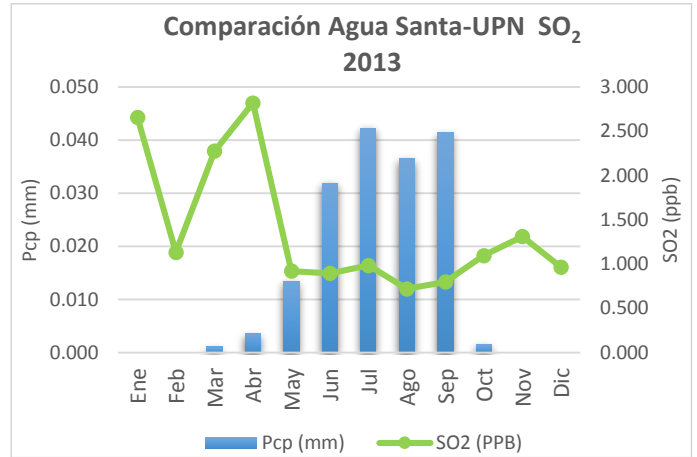
Gráfica 140 Comparación C de SO₂ frente a Pcp 2012
Fuente: Elaboración propia



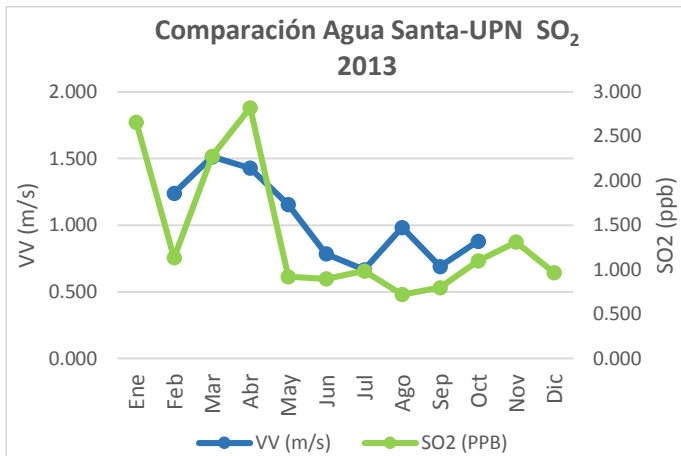
Gráfica 141 Comparación C de SO₂ frente a VV 2012
Fuente: Elaboración propia



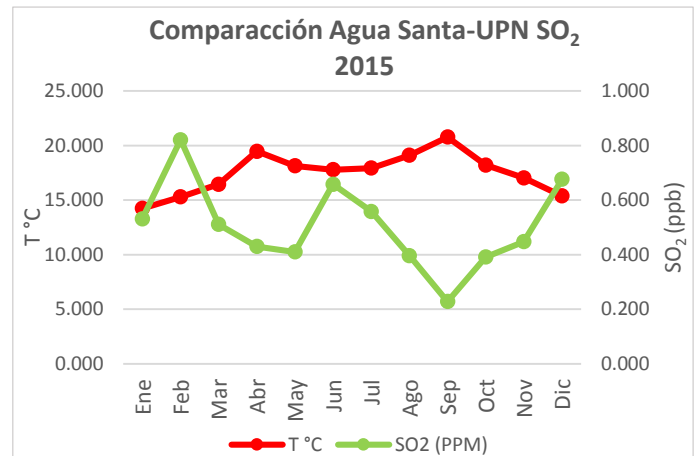
Gráfica 142 Comparación C de SO₂ frente a T°C 2013
Fuente: Elaboración propia



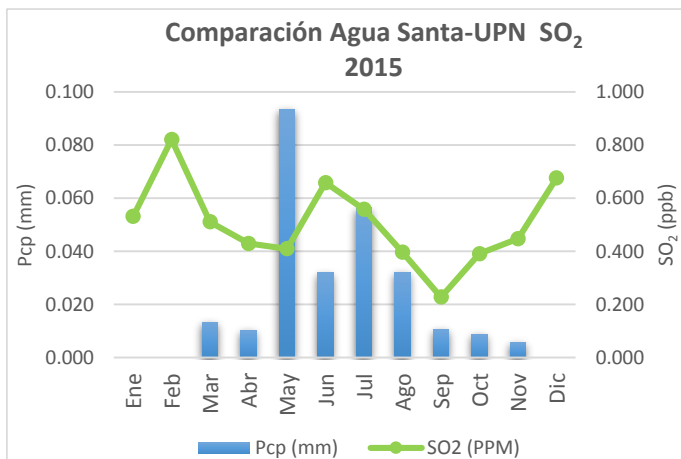
Gráfica 143 Comparación C de SO₂ frente a Pcp 2013
Fuente: Elaboración propia



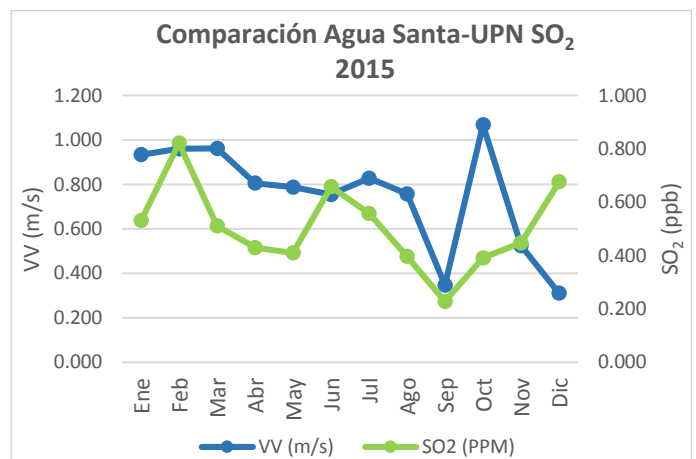
Gráfica 144 Comparación C de SO₂ frente a VV 2013
Fuente: Elaboración propia



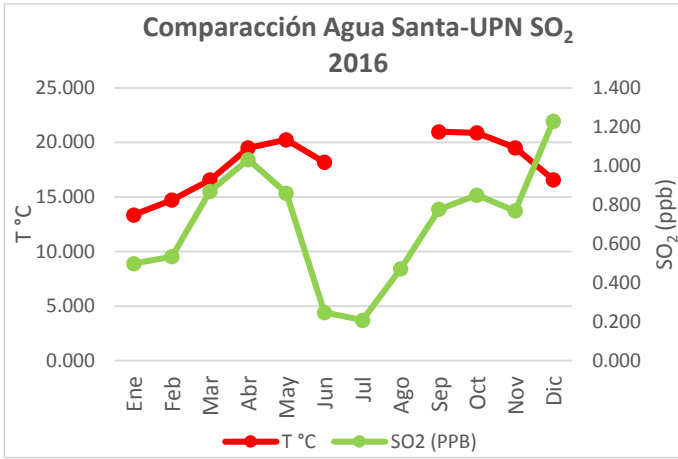
Gráfica 145 Comparación C de SO₂ frente a T°C 2015
Fuente: Elaboración propia



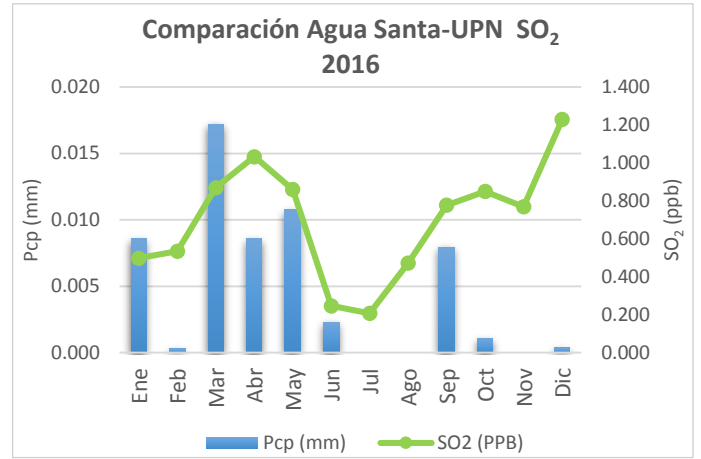
Gráfica 146 Comparación C de SO₂ frente a Pcp 2015
Fuente: Elaboración propia



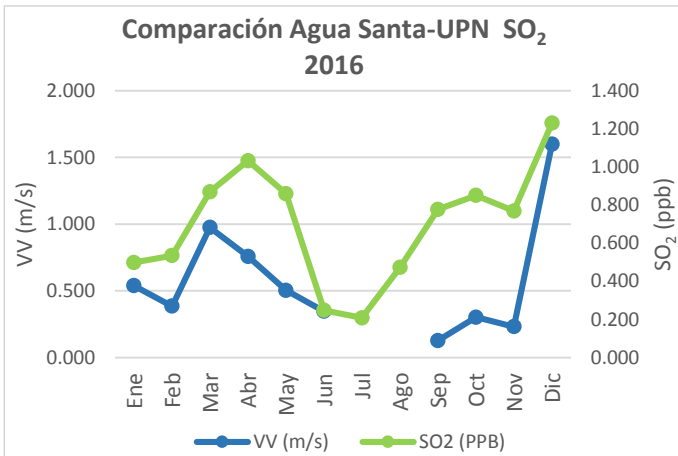
Gráfica 147 Comparación C de SO₂ frente a VV 2015
Fuente: Elaboración propia



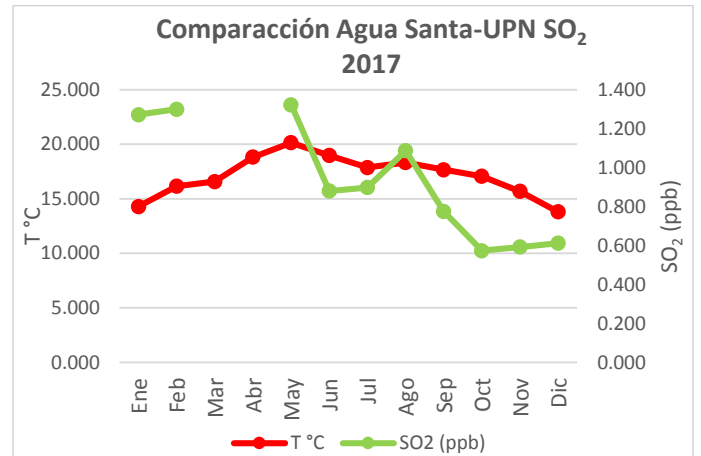
Gráfica 148 Comparación C de SO₂ frente a T°C 2016
Fuente: Elaboración propia



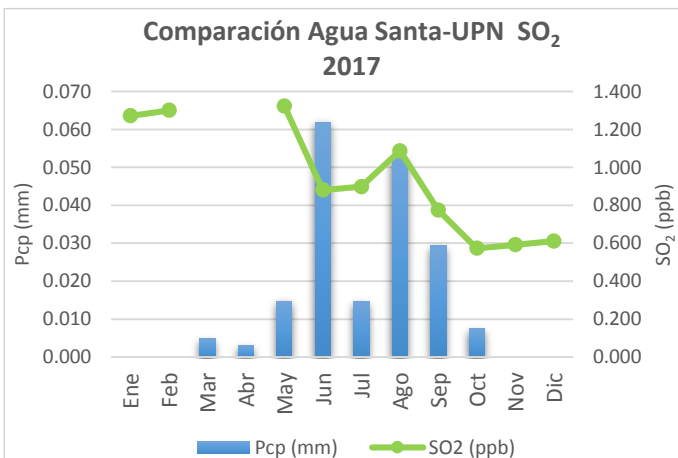
Gráfica 149 Comparación C de SO₂ frente a Pcp 2016
Fuente: Elaboración propia



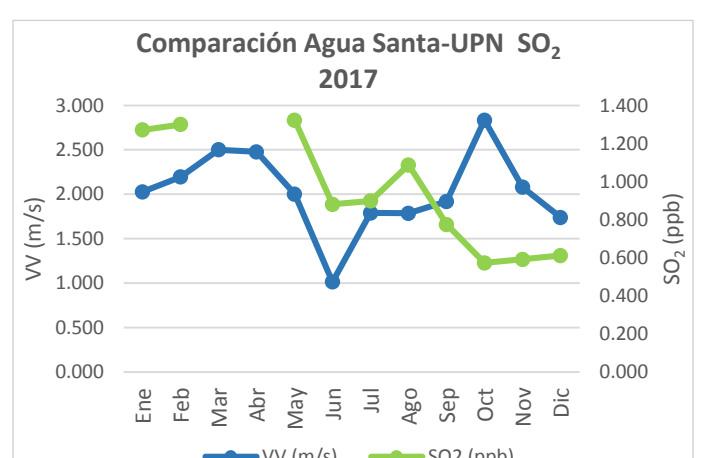
Gráfica 150 Comparación C de SO₂ frente a VV 2017
Fuente: Elaboración propia



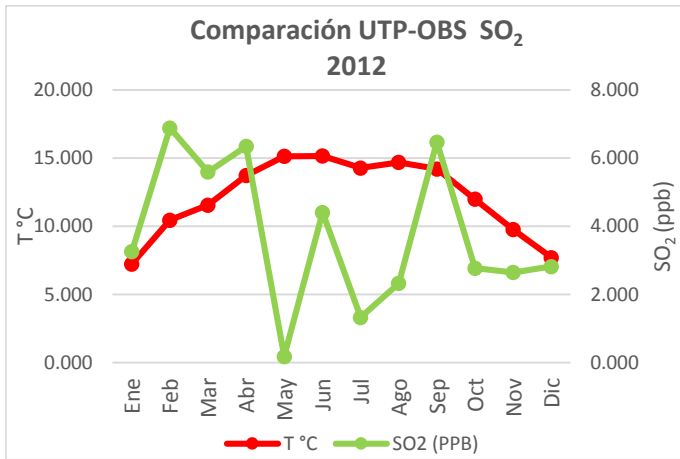
Gráfica 151 Comparación C de SO₂ frente a T°C 2017
Fuente: Elaboración propia



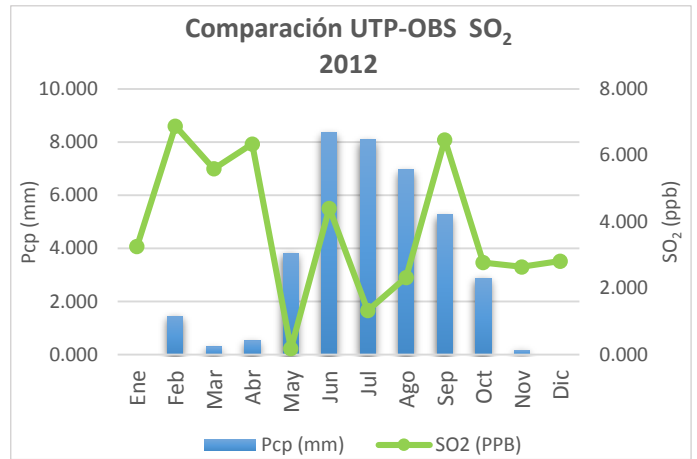
Gráfica 152 Comparación C de SO₂ frente a Pcp 2017
Fuente: Elaboración propia



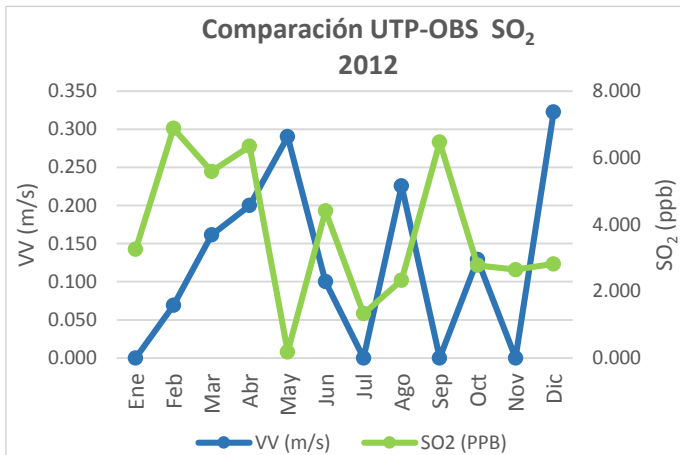
Gráfica 153 Comparación C de SO₂ frente a VV 2017
Fuente: Elaboración propia



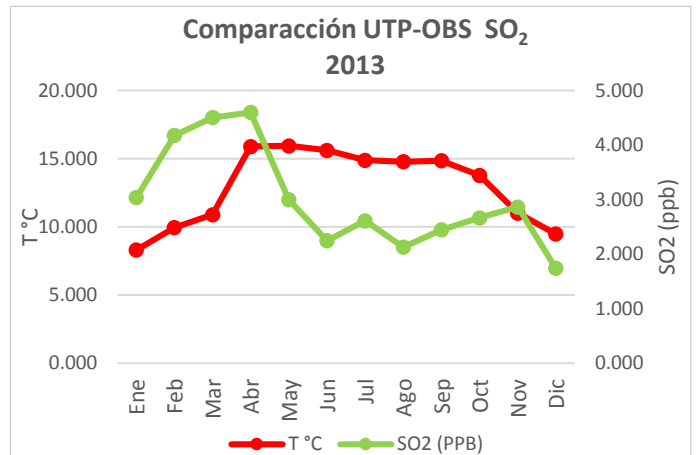
Gráfica 154 Comparación D de SO₂ frente a T °C 2012
Fuente: Elaboración propia



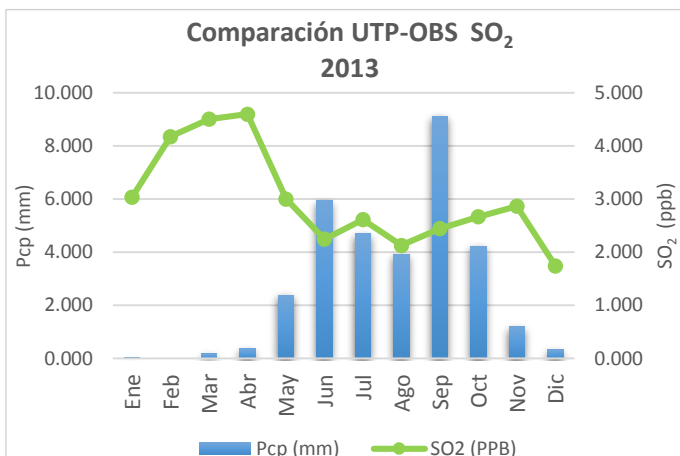
Gráfica 155 Comparación D de SO₂ frente a Pcp 2012
Fuente: Elaboración propia



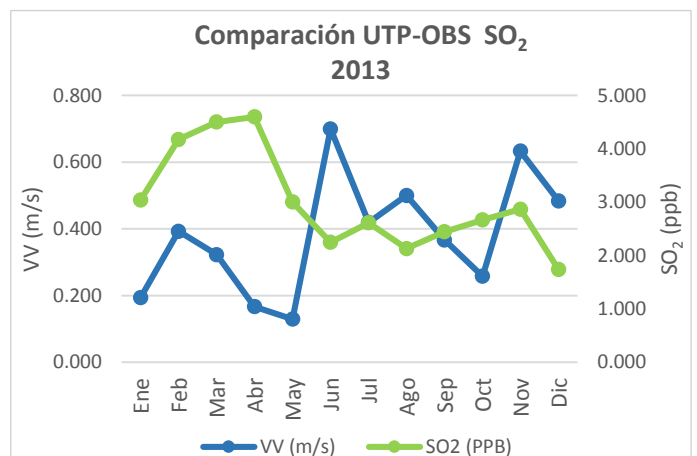
Gráfica 156 Comparación D de SO₂ frente a VV 2012
Fuente: Elaboración propia



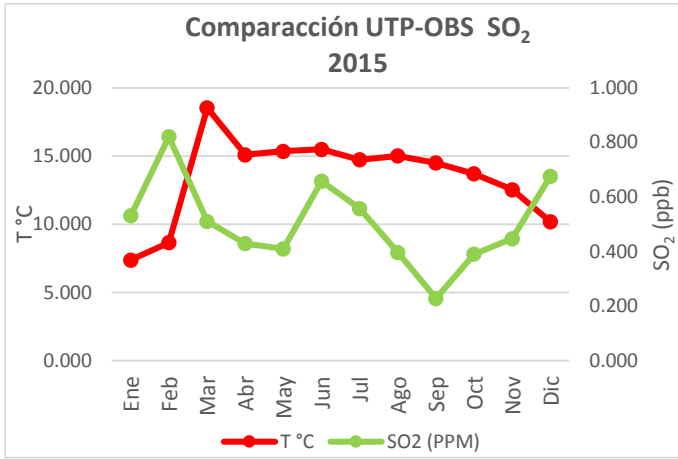
Gráfica 157 Comparación D de SO₂ frente a T °C 2013
Fuente: Elaboración propia



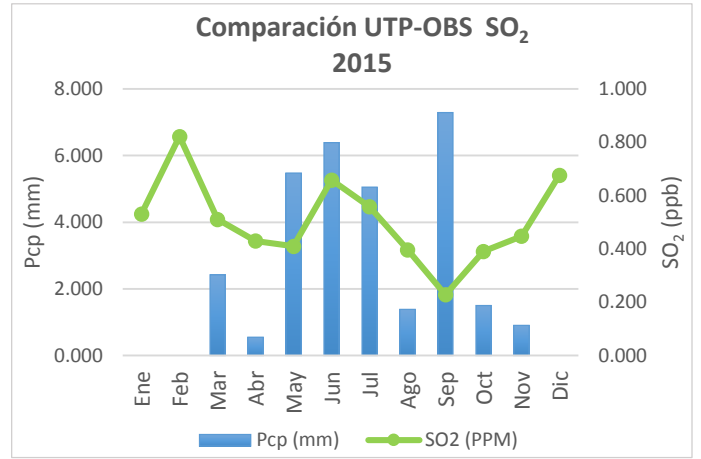
Gráfica 158 Comparación D de SO₂ frente a Pcp 2013
Fuente: Elaboración propia



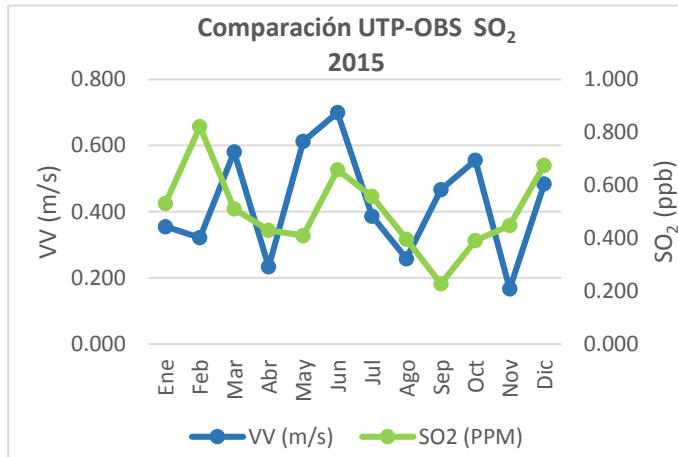
Gráfica 159 Comparación D de SO₂ frente a VV 2013
Fuente: Elaboración propia



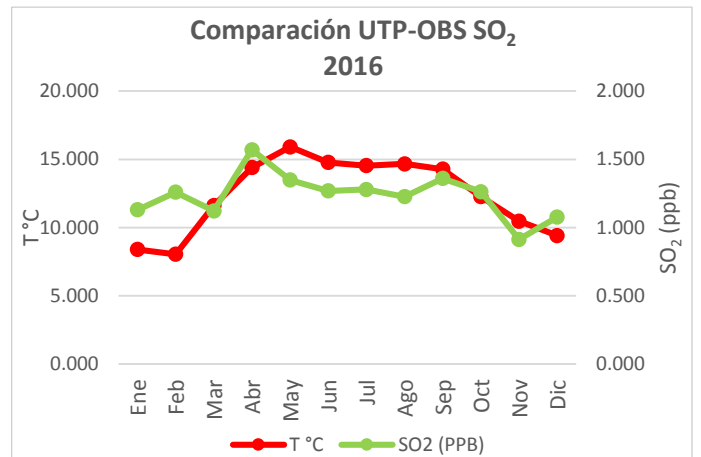
Gráfica 160 Comparación D de SO₂ frente a T °C 2015
Fuente: Elaboración propia



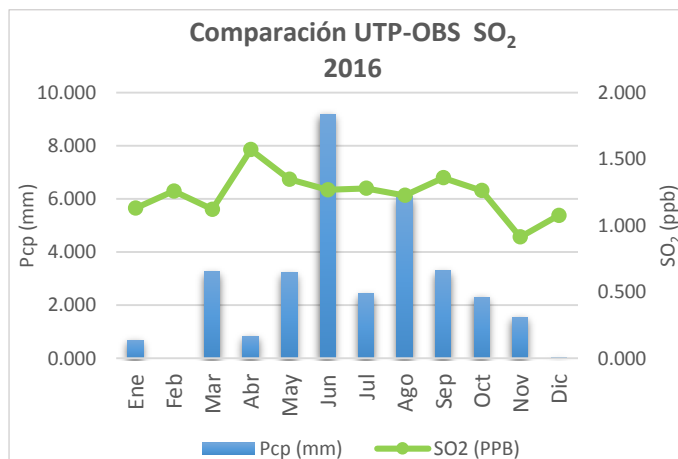
Gráfica 161 Comparación D de SO₂ frente a VV 2015
Fuente: Elaboración propia



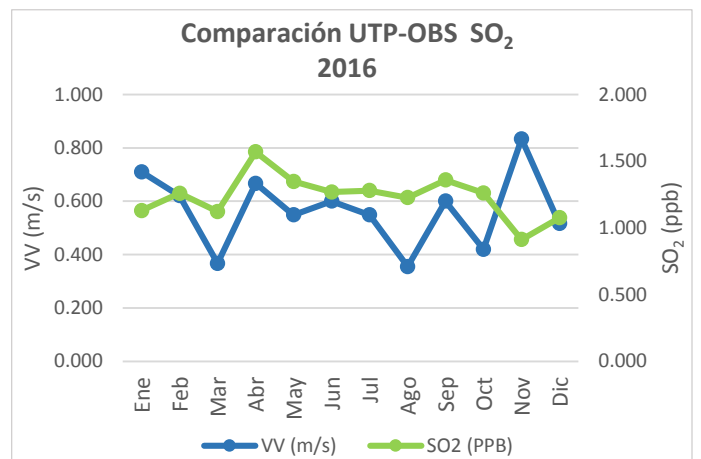
Gráfica 162 Comparación D de SO₂ frente a VV 2015
Fuente: Elaboración propia



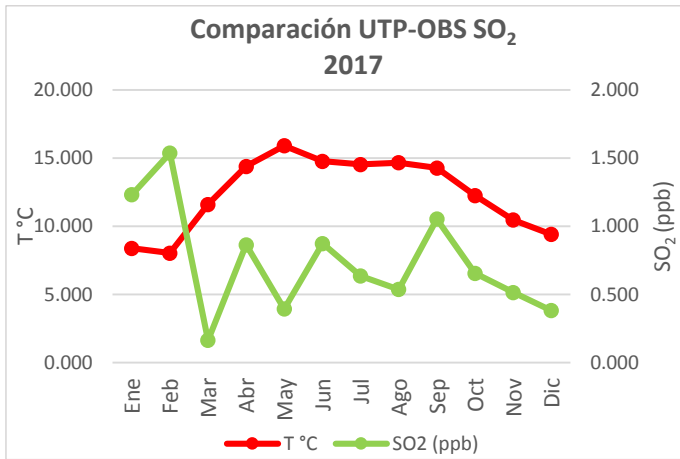
Gráfica 163 Comparación D de SO₂ frente a T °C 2016
Fuente: Elaboración propia



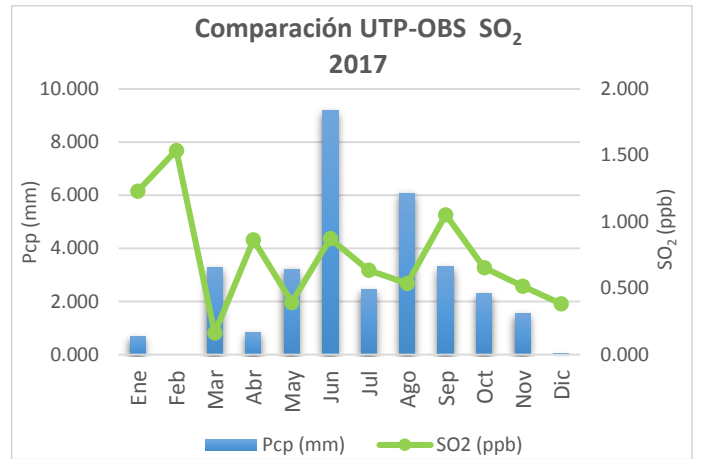
Gráfica 164 Comparación D de SO₂ frente a Pcp 2016
Fuente: Elaboración propia



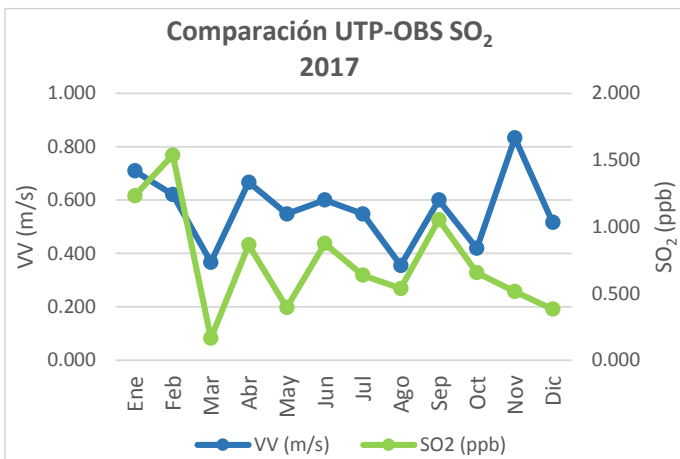
Gráfica 165 Comparación D de SO₂ frente a VV 2016
Fuente: Elaboración propia



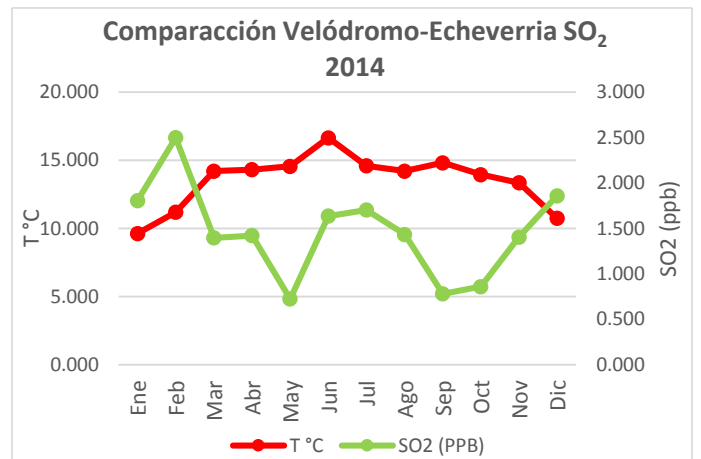
Gráfica 166 Comparación D de SO₂ frente a T °C 2017
Fuente: Elaboración propia



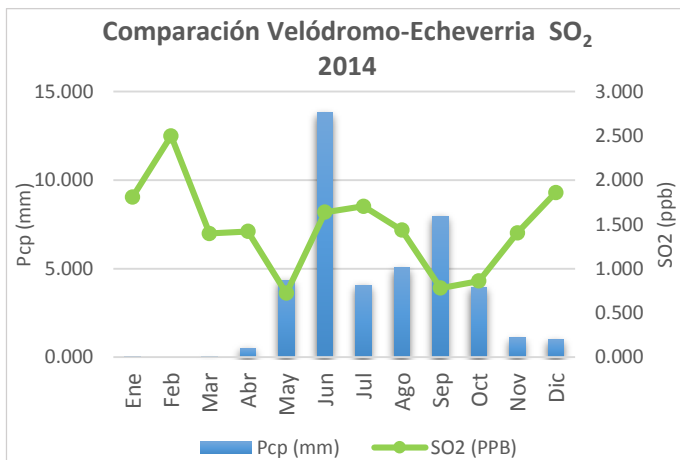
Gráfica 167 Comparación D de SO₂ frente a Pcp 2017
Fuente: Elaboración propia



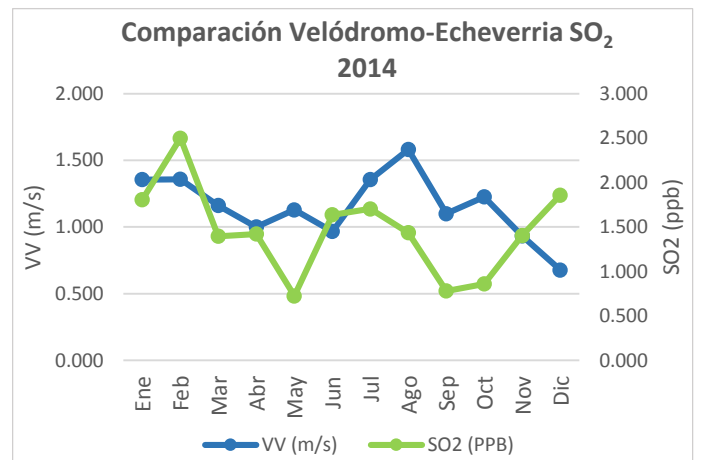
Gráfica 168 Comparación D de SO₂ frente a VV 2017
Fuente: Elaboración propia



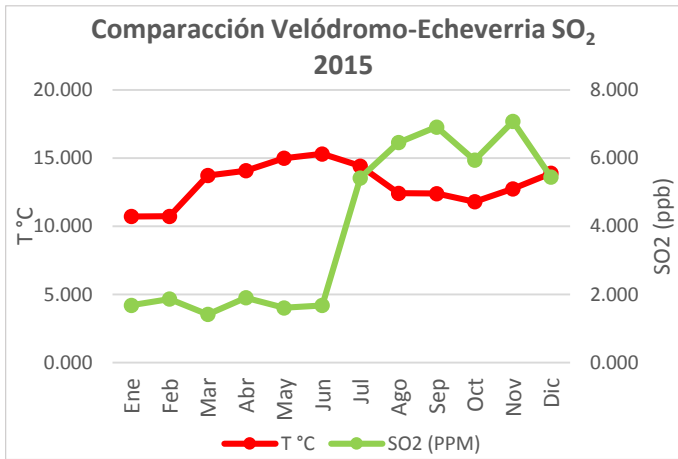
Gráfica 169 Comparación E de SO₂ frente a T °C 2014
Fuente: Elaboración propia



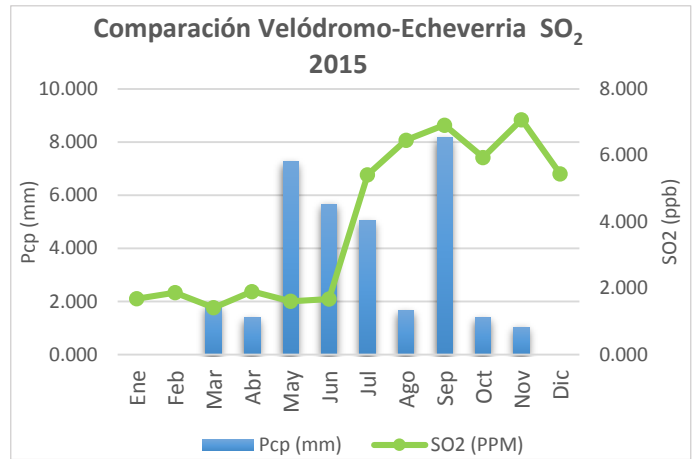
Gráfica 170 Comparación E de SO₂ frente a Pcp 2014
Fuente: Elaboración propia



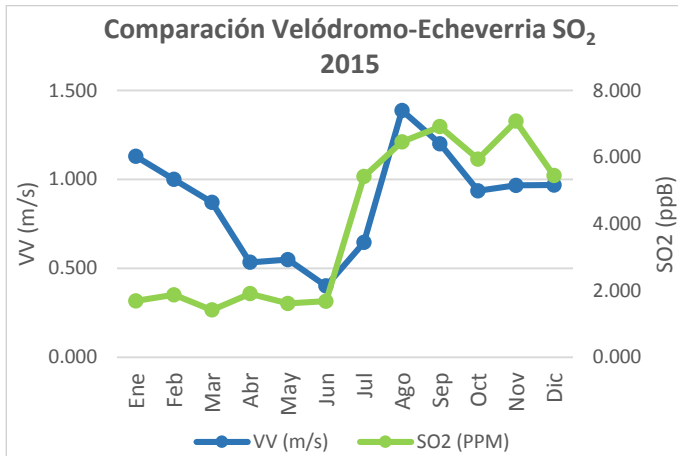
Gráfica 171 Comparación E de SO₂ frente a VV 2014
Fuente: Elaboración propia



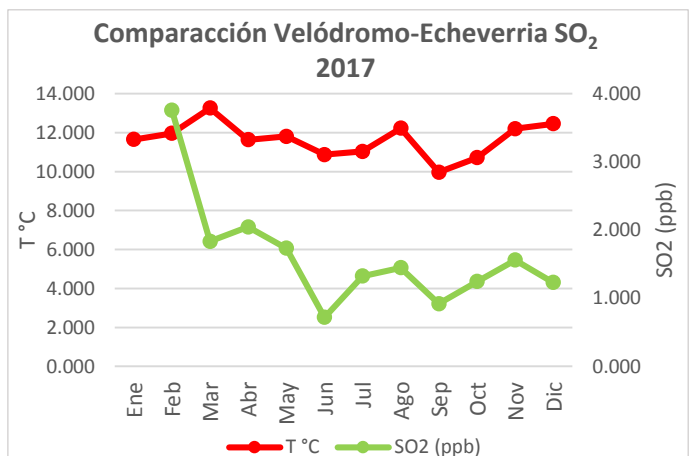
Gráfica 172 Comparación E de SO₂ frente a T°C 2015
Fuente: Elaboración propia



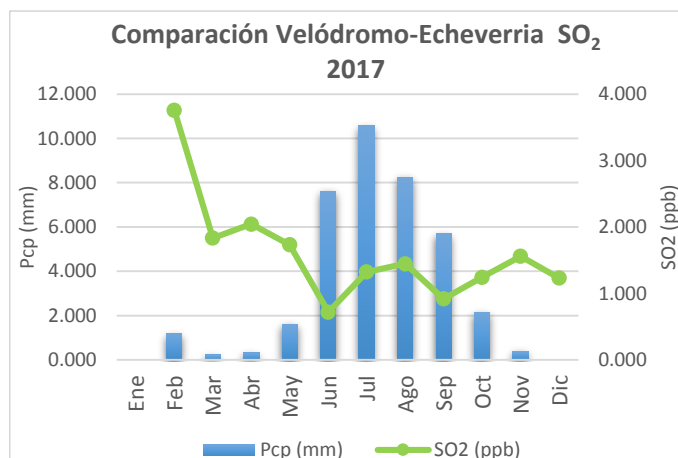
Gráfica 173 Comparación E de SO₂ frente a Pcp 2015
Fuente: Elaboración propia



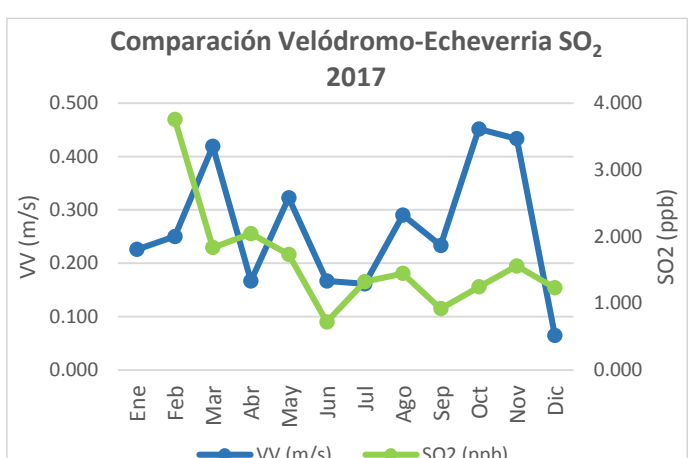
Gráfica 174 Comparación E de SO₂ frente a VV 2015
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 175 Comparación E de SO₂ frente a T°C 2017
Fuente: Elaboración propia

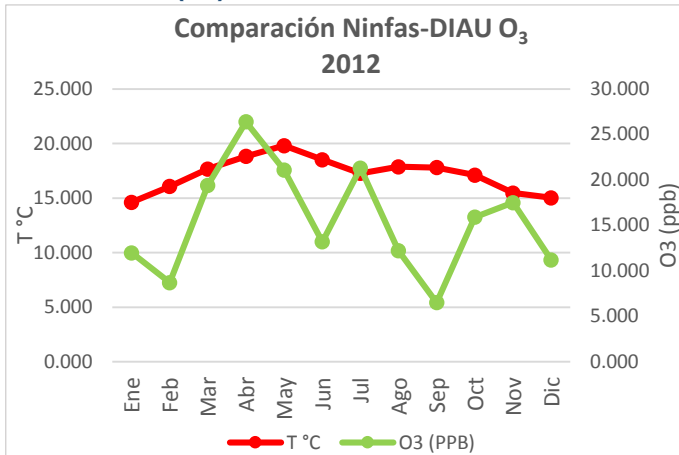


Gráfica 176 Comparación E de SO₂ frente a Pcp 2017
Fuente: Elaboración propia

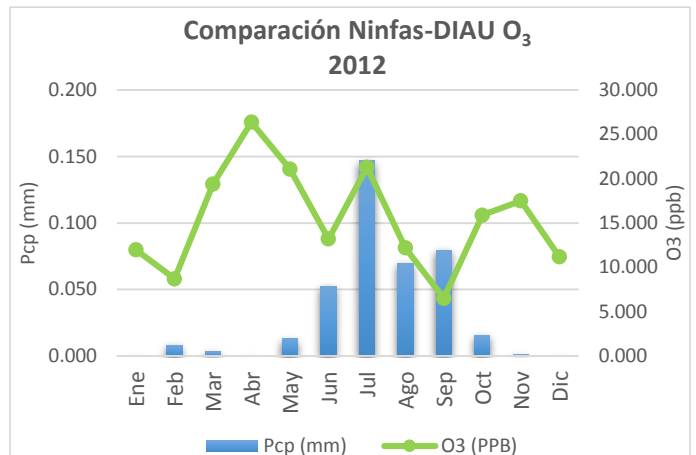


Gráfica 177 Comparación E de SO₂ frente a VV 2017
Fuente: Elaboración propia

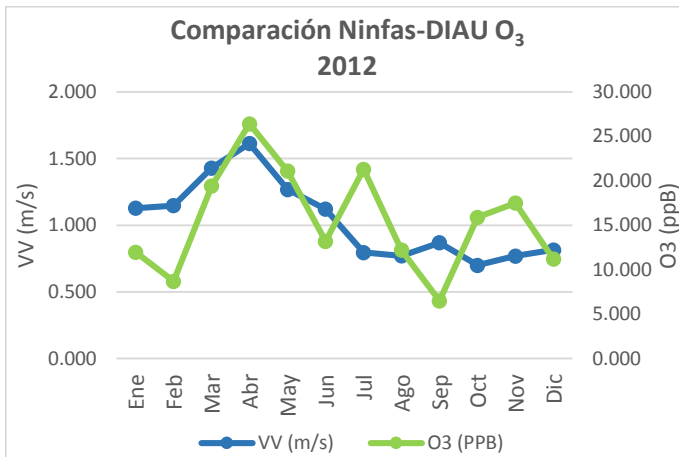
Ozono (O₃)



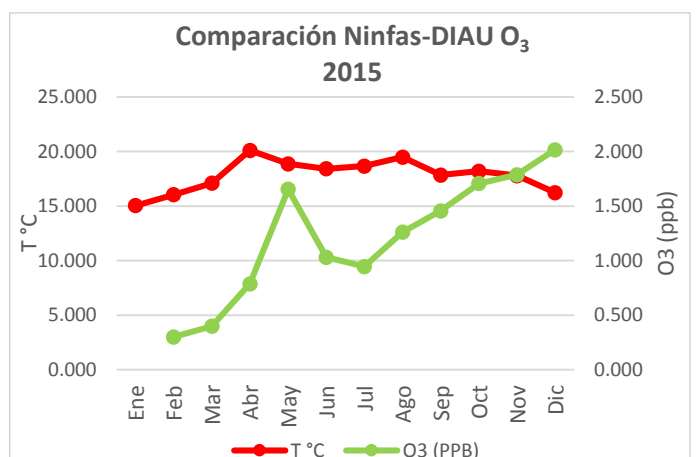
Gráfica 178 Comparación A de O₃ frente a T °C 2012
Fuente: Elaboración propia



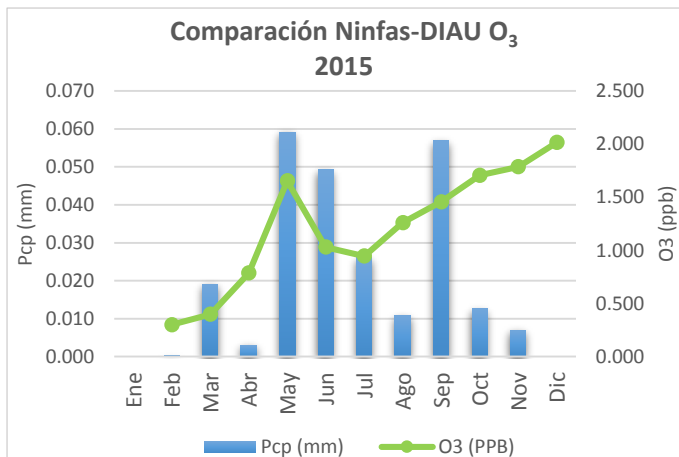
Gráfica 179 Comparación A de O₃ frente a Pcp 2012
Fuente: Elaboración propia



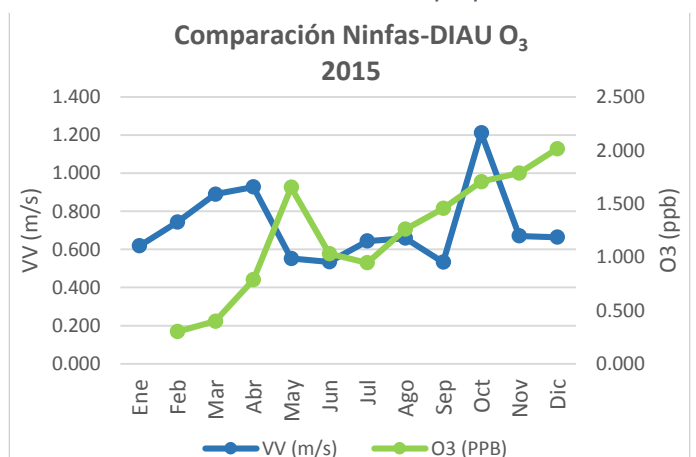
Gráfica 180 Comparación A de O₃ frente a VV 2012
Fuente: Elaboración propia



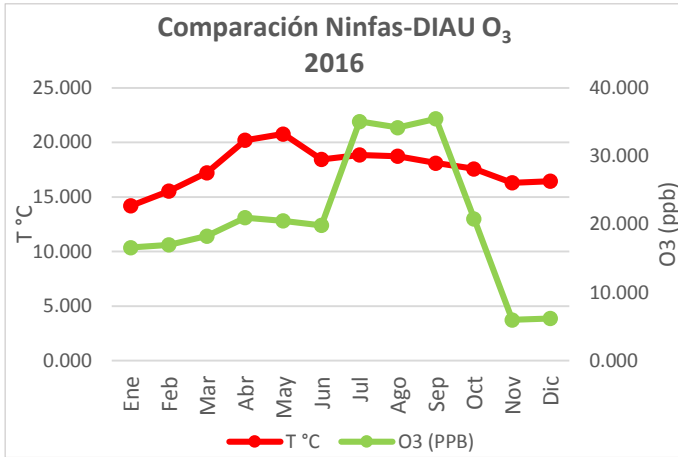
Gráfica 181 Comparación A de O₃ frente a T °C 2015
Fuente: Elaboración propia



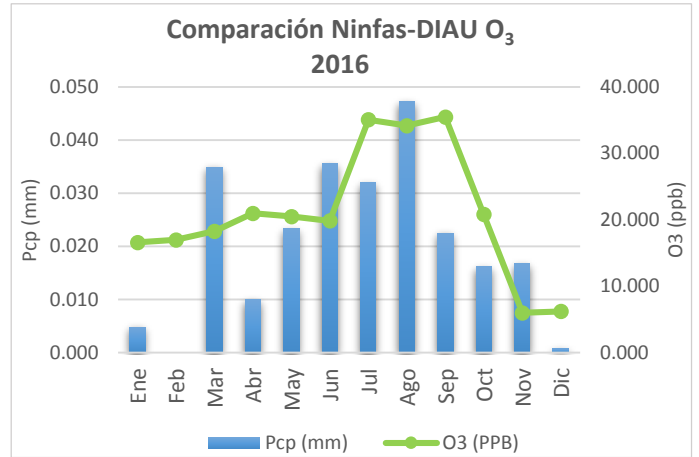
Gráfica 182 Comparación A de O₃ frente a Pcp 2015
Fuente: Elaboración propia



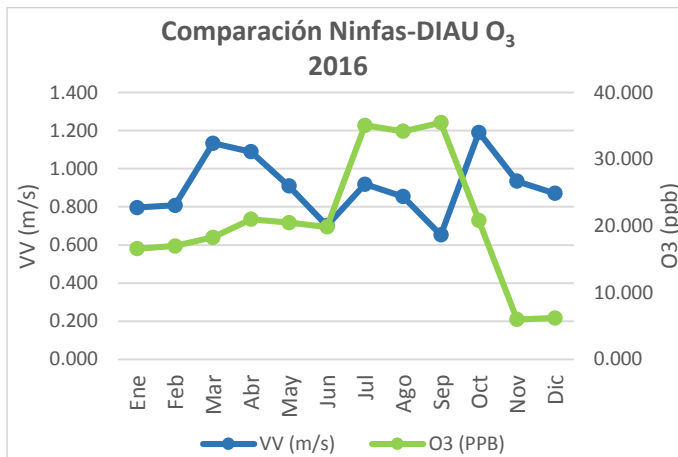
Gráfica 183 Comparación A de O₃ frente a VV 2015
Fuente: Elaboración propia



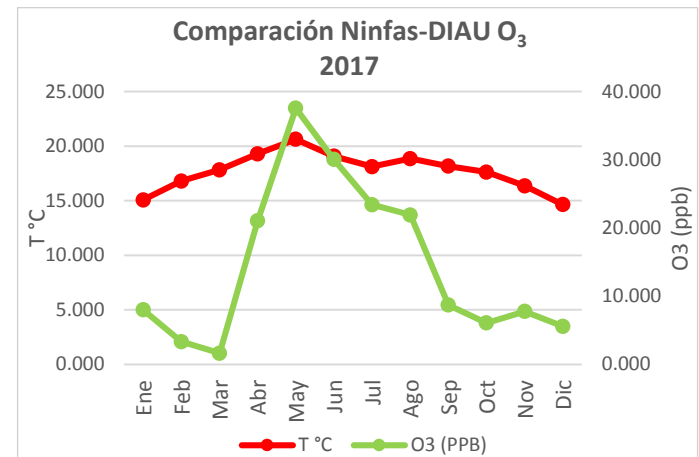
Gráfica 184 Comparación A de O₃ frente a T°C 2016
Fuente: Elaboración propia



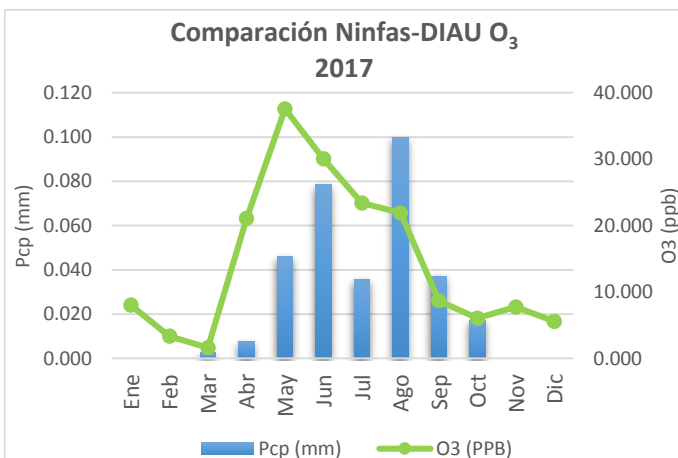
Gráfica 185 Comparación A de O₃ frente a Pcp 2016
Fuente: Elaboración propia



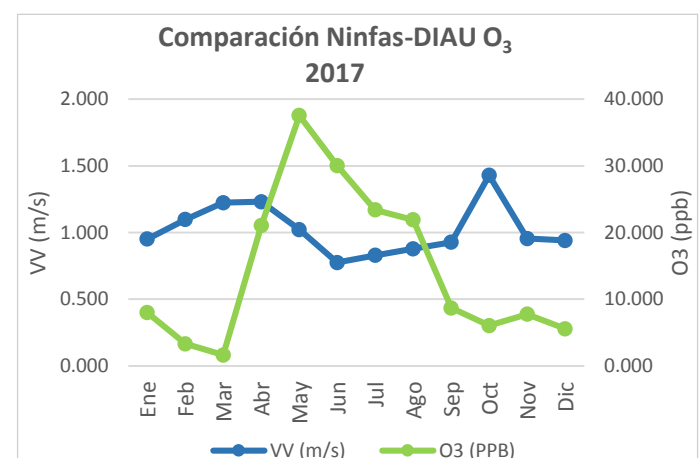
Gráfica 186 Comparación A de O₃ frente a VV 2016
Fuente: Elaboración propia



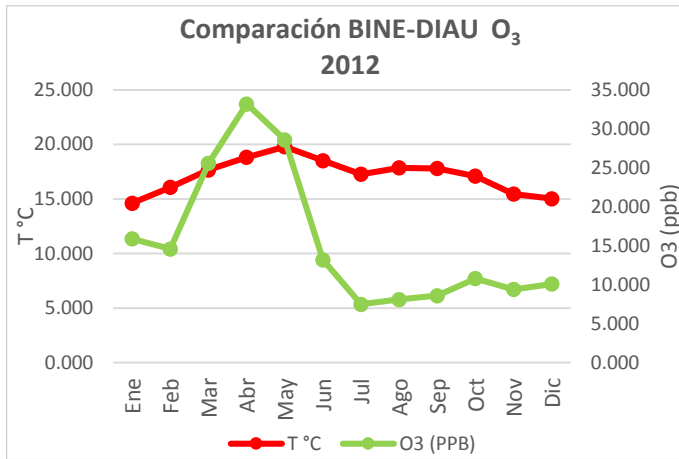
Gráfica 187 Comparación A de O₃ frente a T°C 2017
Fuente: Elaboración propia



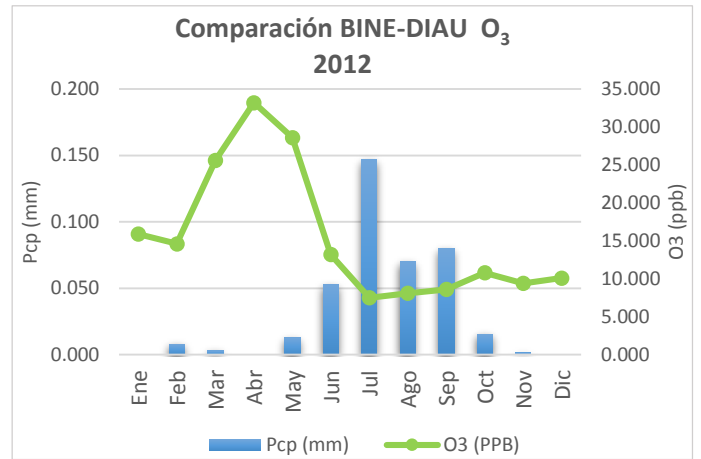
Gráfica 188 Comparación A de O₃ frente a Pcp 2017
Fuente: Elaboración propia



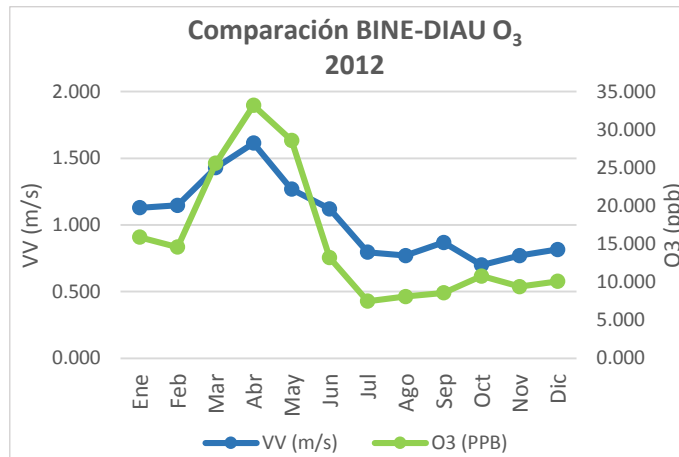
Gráfica 189 Comparación A de O₃ frente a VV 2017
Fuente: Elaboración propia



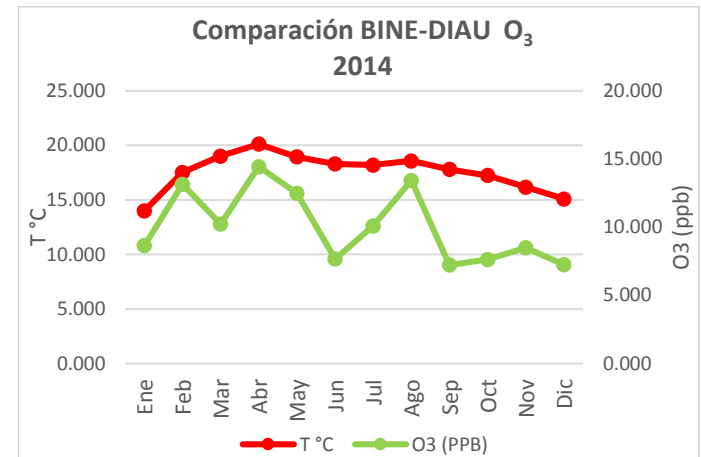
Gráfica 190 Comparación B de O₃ frente a T°C 2012
Fuente: Elaboración propia



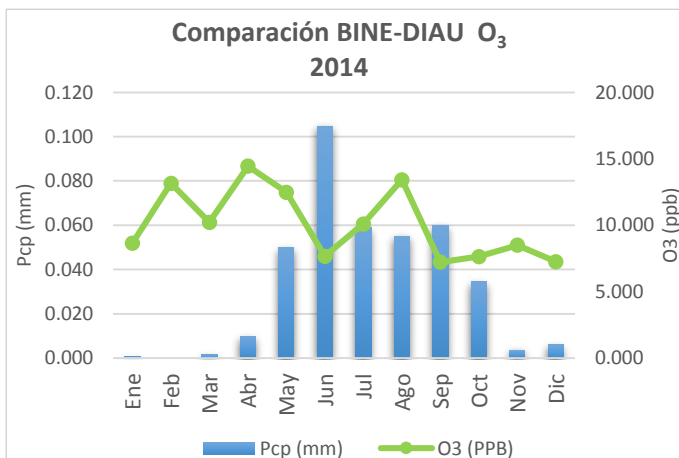
Gráfica 191 Comparación B de O₃ frente a Pcp 2012
Fuente: Elaboración propia



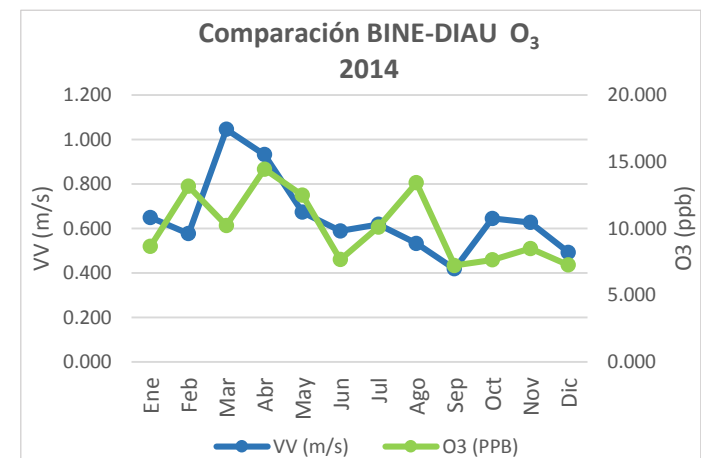
Gráfica 192 Comparación B de O₃ frente a VV 2012
Fuente: Elaboración propia



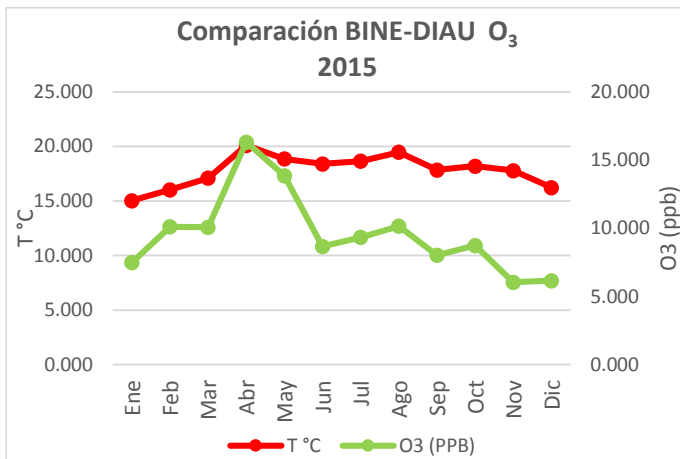
Gráfica 193 Comparación B de O₃ frente a T°C 2014
Fuente: Elaboración propia



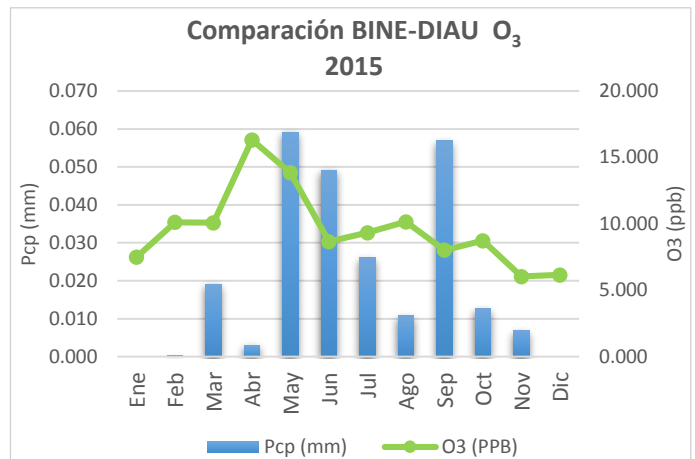
Gráfica 194 Comparación B de O₃ frente a Pcp 2014
Fuente: Elaboración propia



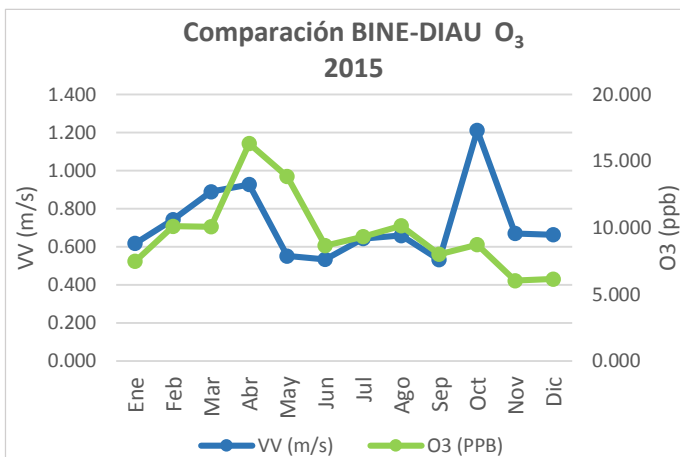
Gráfica 195 Comparación B de O₃ frente a VV 2014
Fuente: Elaboración propia



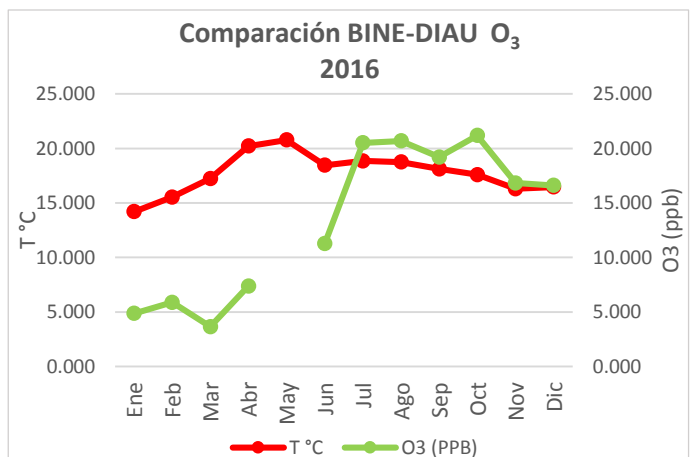
Gráfica 196 Comparación B de O₃ frente a T°C 2015
Fuente: Elaboración propia



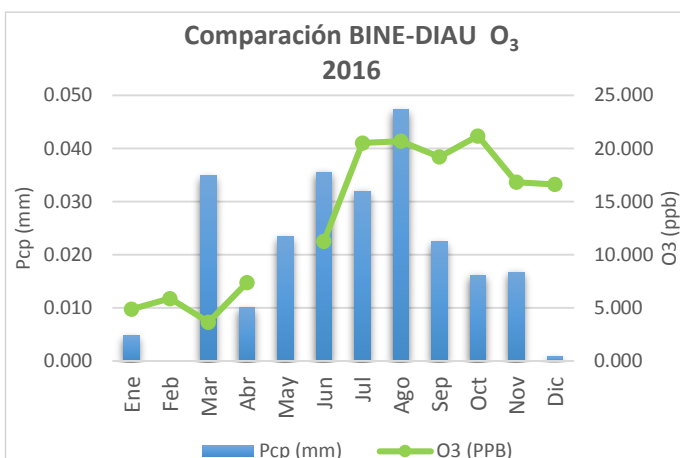
Gráfica 197 Comparación B de O₃ frente a Pcp 2015
Fuente: Elaboración propia



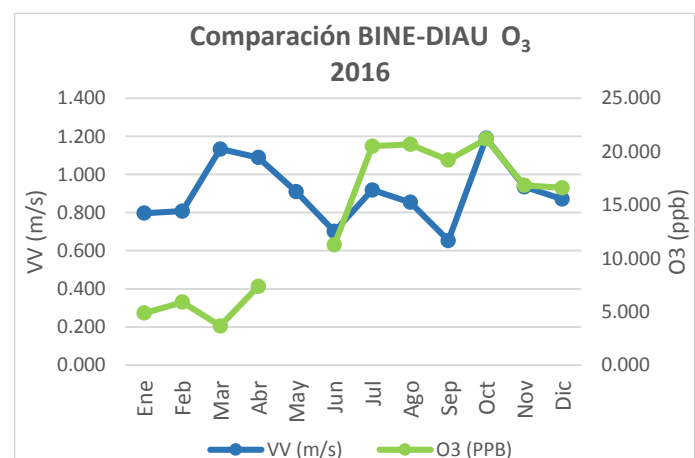
Gráfica 198 Comparación B de O₃ frente a VV 2015
Fuente: Elaboración propia



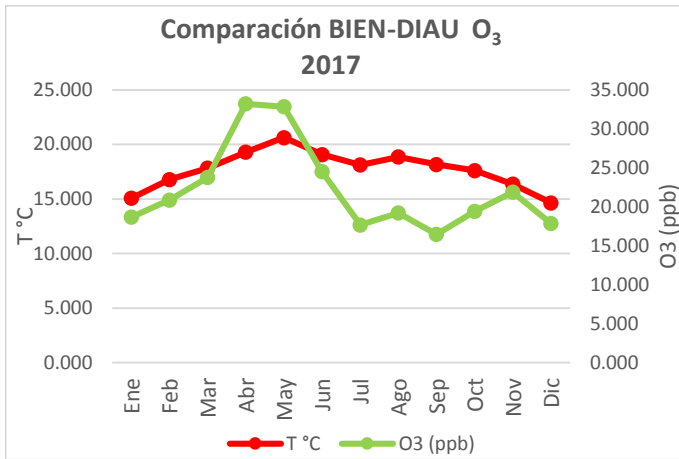
Gráfica 199 Comparación B de O₃ frente a T°C 2016
Fuente: Elaboración propia



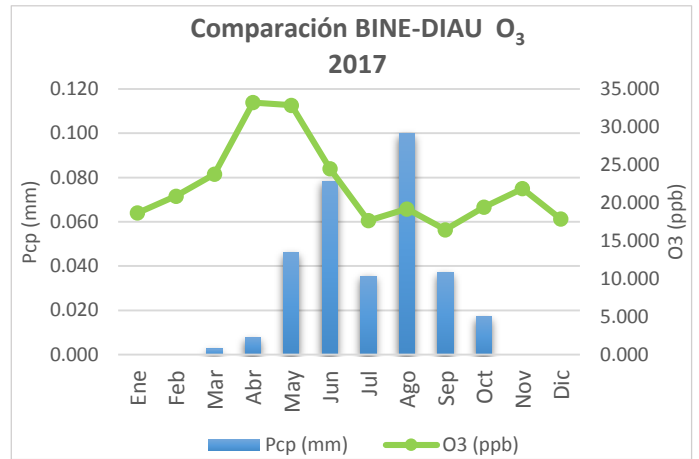
Gráfica 200 Comparación B de O₃ frente a Pcp 2016
Fuente: Elaboración propia



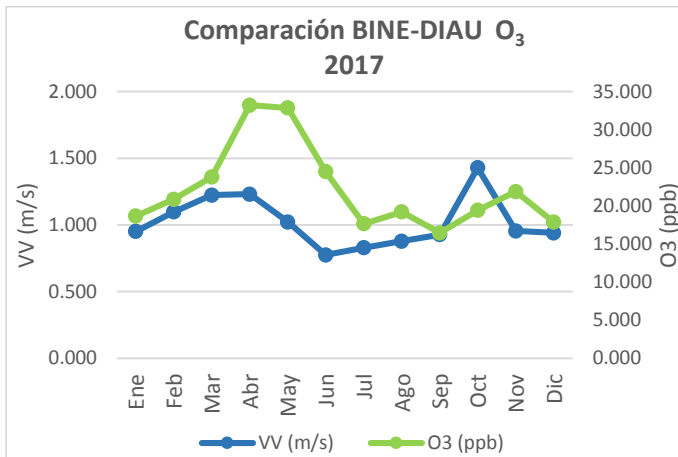
Gráfica 201 Comparación B de O₃ frente a VV 2016
Fuente: Elaboración propia



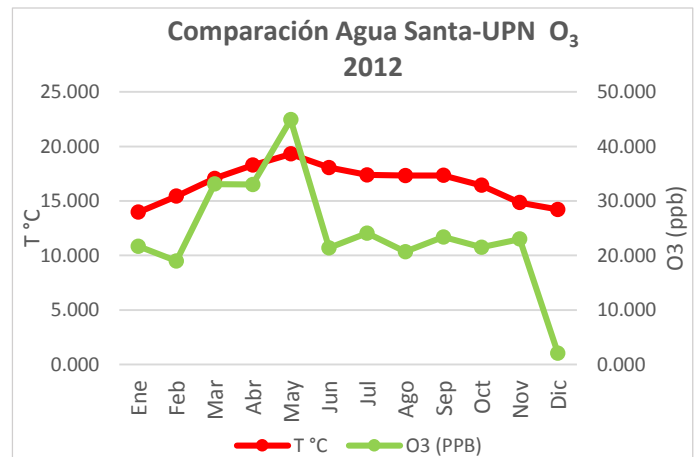
Gráfica 202 Comparación B de O₃ frente a T°C 2017
Fuente: Elaboración propia



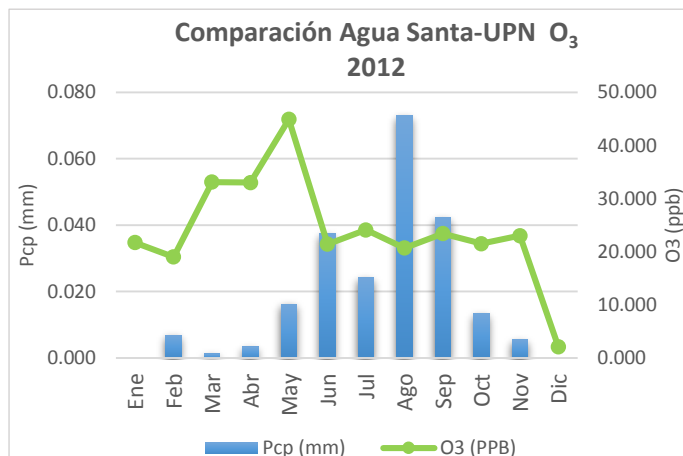
Gráfica 203 Comparación B de O₃ frente a Pcp 2017
Fuente: Elaboración propia



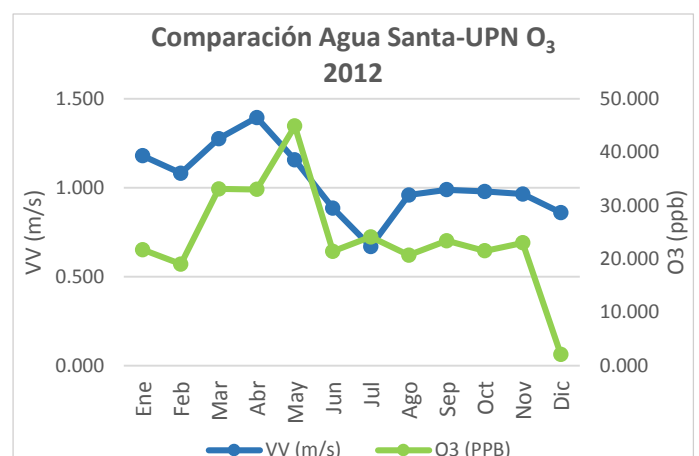
Gráfica 204 Comparación B de O₃ frente a VV 2017
Fuente: Elaboración propia



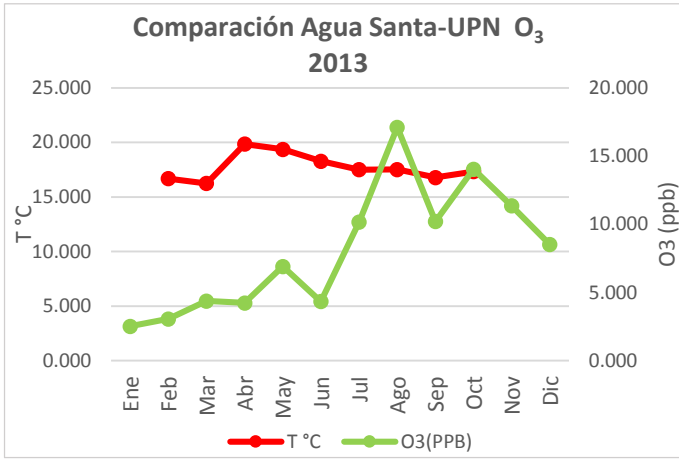
Gráfica 205 Comparación C de O₃ frente a T°C 2012
Fuente: Elaboración propia



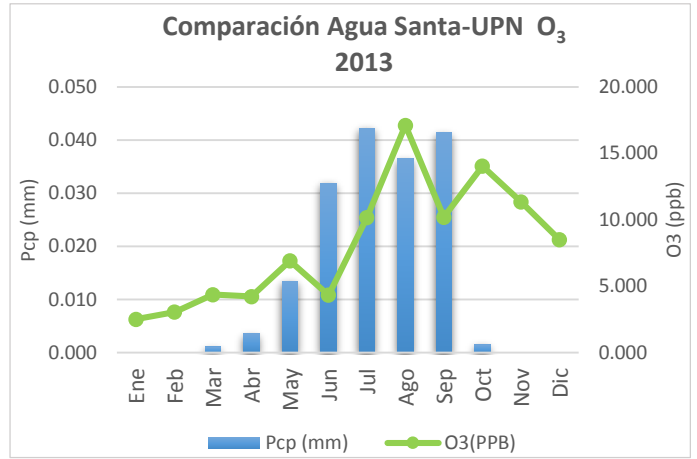
Gráfica 206 Comparación C de O₃ frente a Pcp 2012
Fuente: Elaboración propia



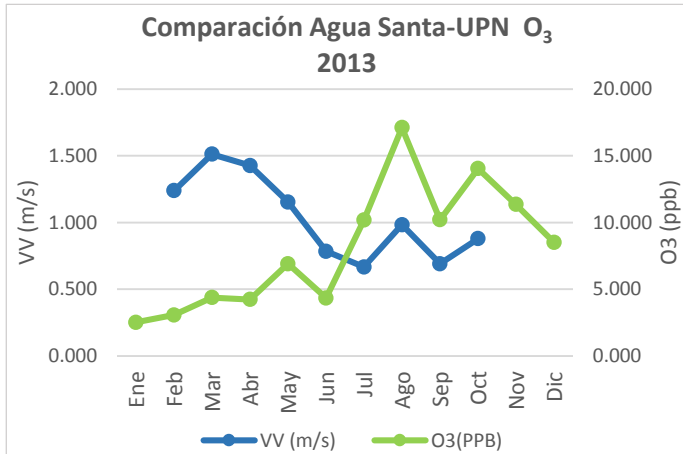
Gráfica 207 Comparación C de O₃ frente a VV 2012
Fuente: Elaboración propia



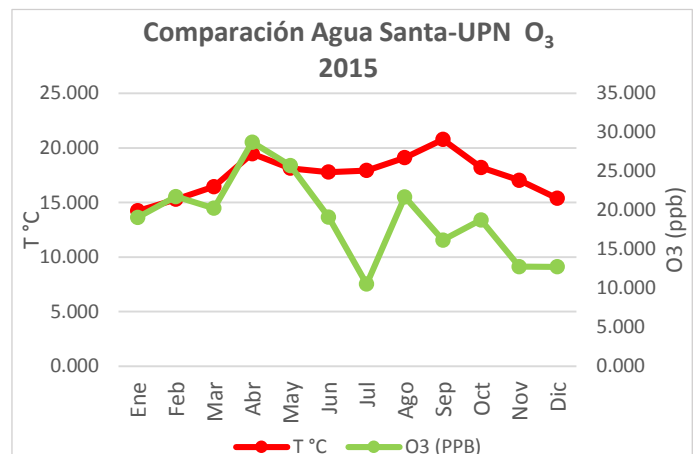
Gráfica 208 Comparación C de O₃ frente a T°C 2013
Fuente: Elaboración propia



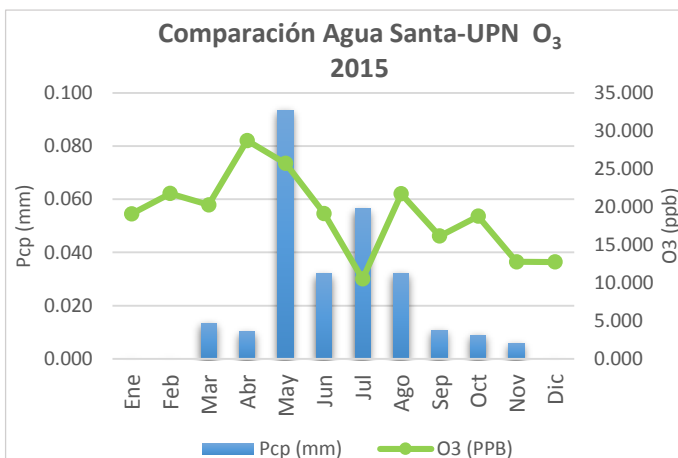
Gráfica 209 Comparación C de O₃ frente a Pcp 2013
Fuente: Elaboración propia



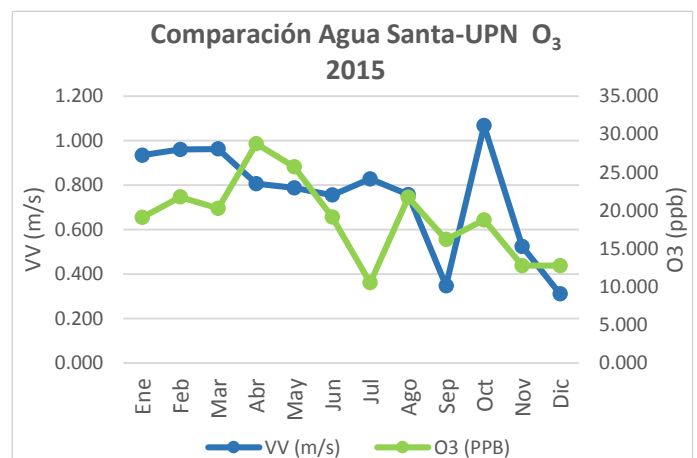
Gráfica 210 Comparación C de O₃ frente a VV 2013
Fuente: Elaboración propia



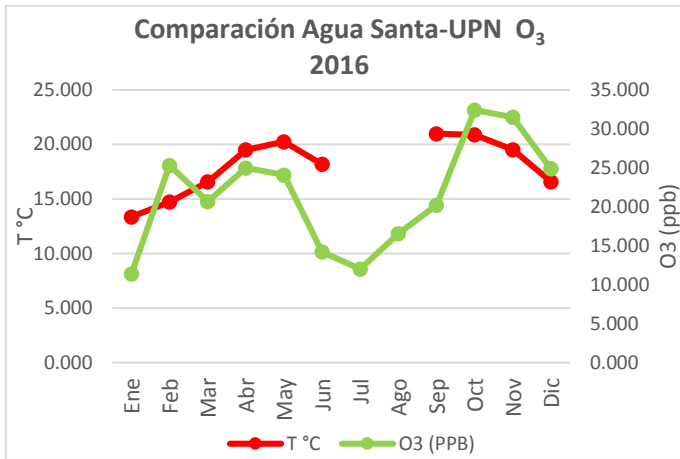
Gráfica 211 Comparación C de O₃ frente a T°C 2015
Fuente: Elaboración propia



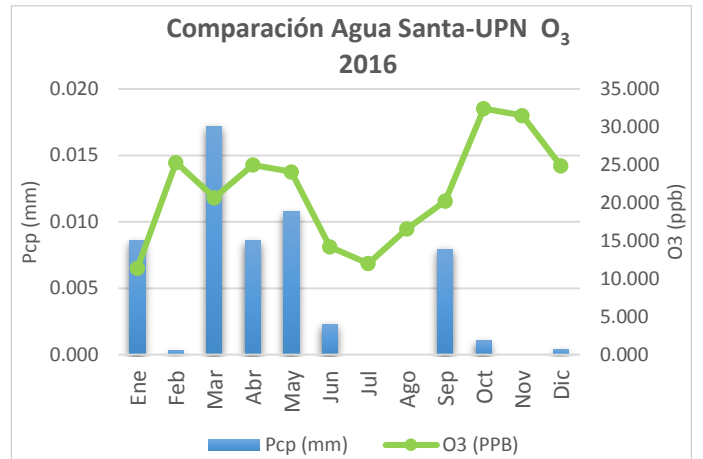
Gráfica 212 Comparación C de O₃ frente a Pcp 2015
Fuente: Elaboración propia



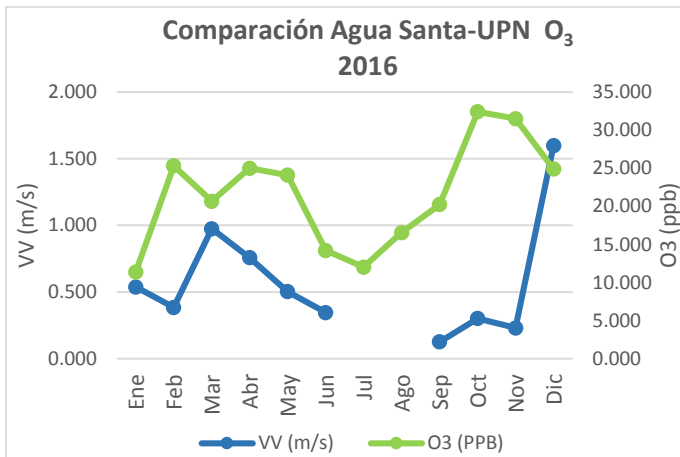
Gráfica 213 Comparación C de O₃ frente a VV 2015
Fuente: Elaboración propia



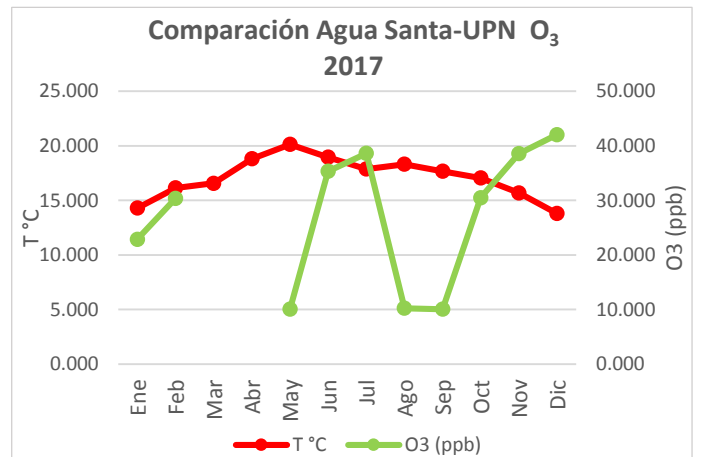
Gráfica 214 Comparación C de O₃ frente a T°C 2016
Fuente: Elaboración propia



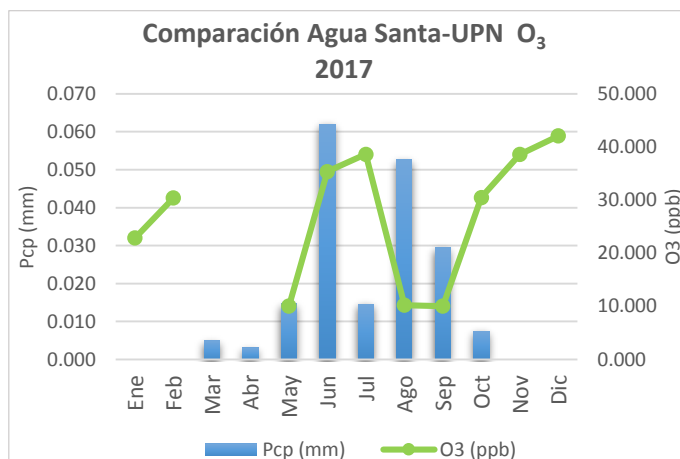
Gráfica 215 Comparación C de O₃ frente a Pcp 2016
Fuente: Elaboración propia



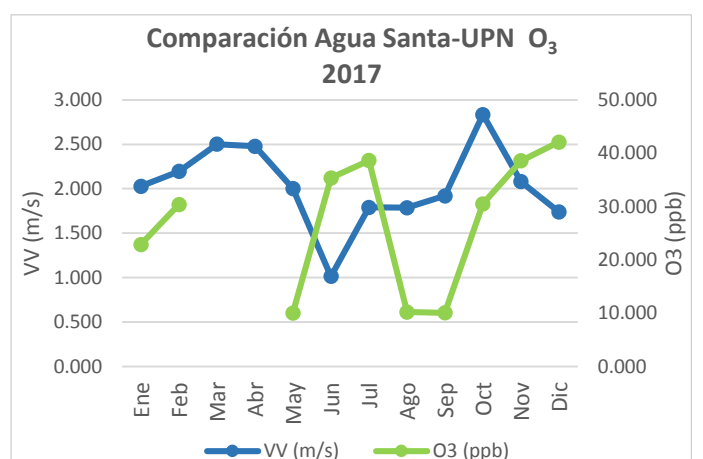
Gráfica 216 Comparación C de O₃ frente a VV 2016
Fuente: Elaboración propia



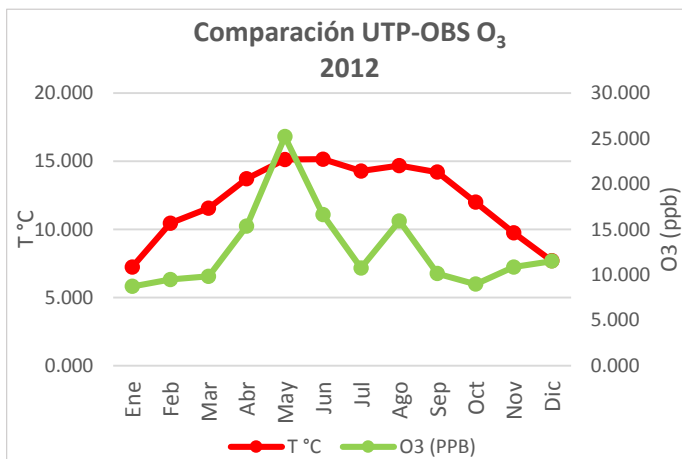
Gráfica 217 Comparación C de O₃ frente a T°C 2017
Fuente: Elaboración propia



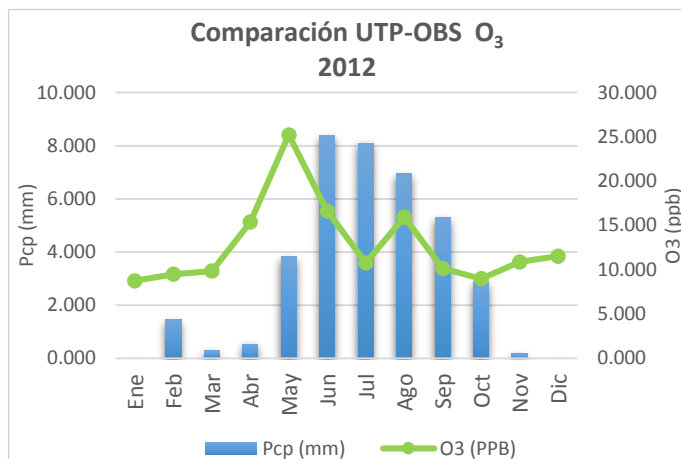
Gráfica 218 Comparación C de O₃ frente a Pcp 2017
Fuente: Elaboración propia



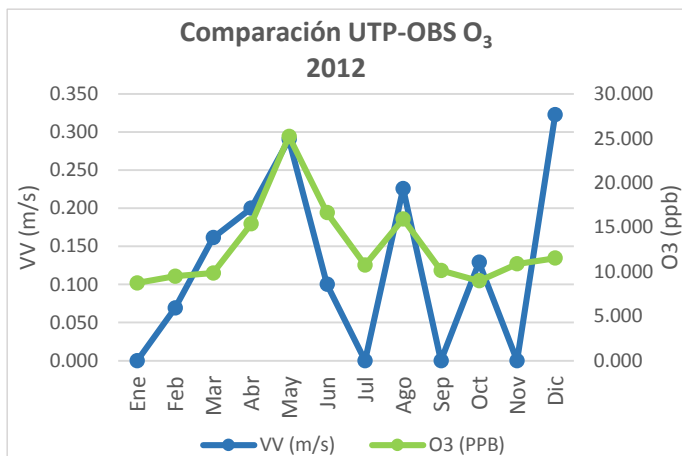
Gráfica 219 Comparación C de O₃ frente a VV 2017
Fuente: Elaboración propia



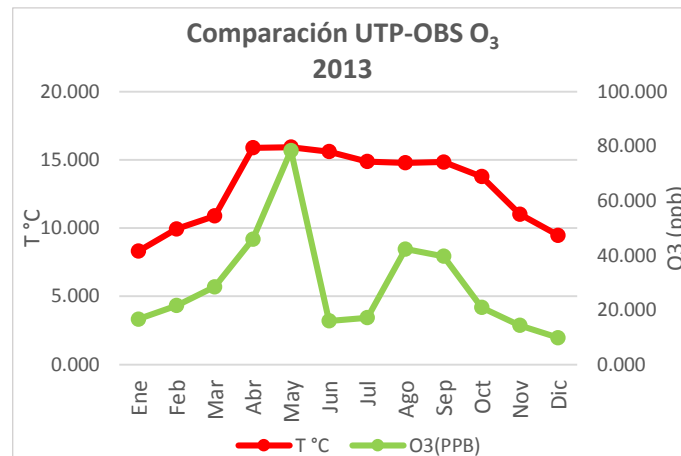
Gráfica 220 Comparación D de O₃ frente a T°C 2012
Fuente: Elaboración propia



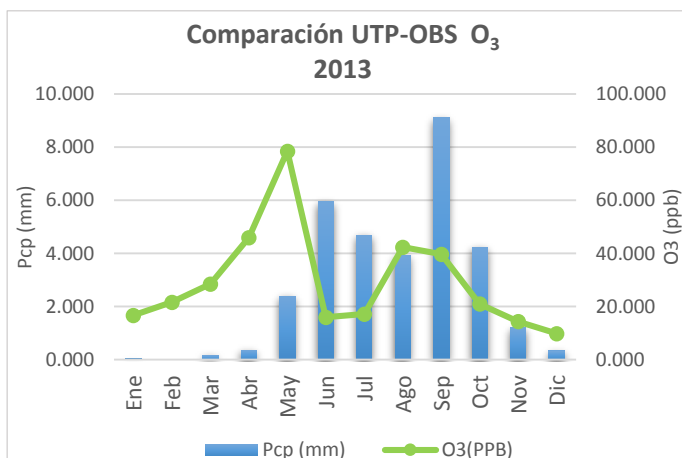
Gráfica 221 Comparación D de O₃ frente a Pcp 2012
Fuente: Elaboración propia



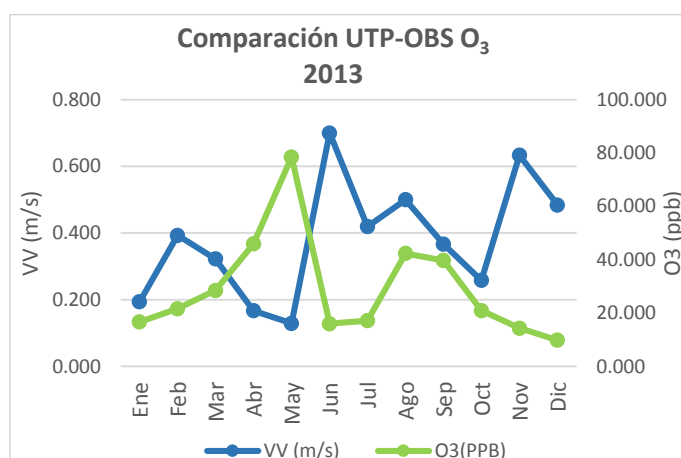
Gráfica 222 Comparación D de O₃ frente a VV 2012
Fuente: Elaboración propia



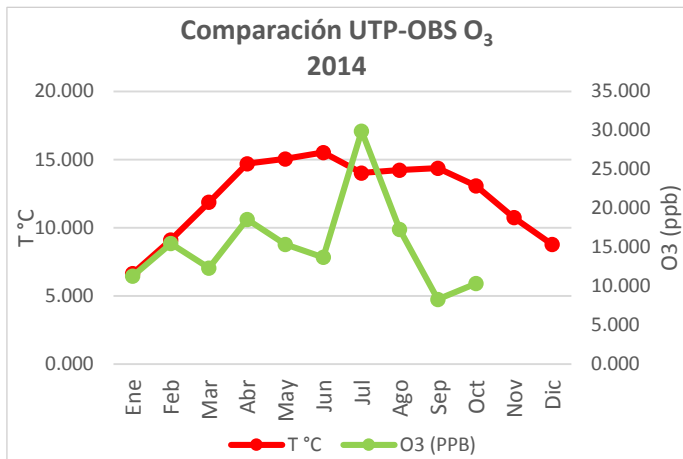
Gráfica 223 Comparación D de O₃ frente a T°C 2013
Fuente: Elaboración propia



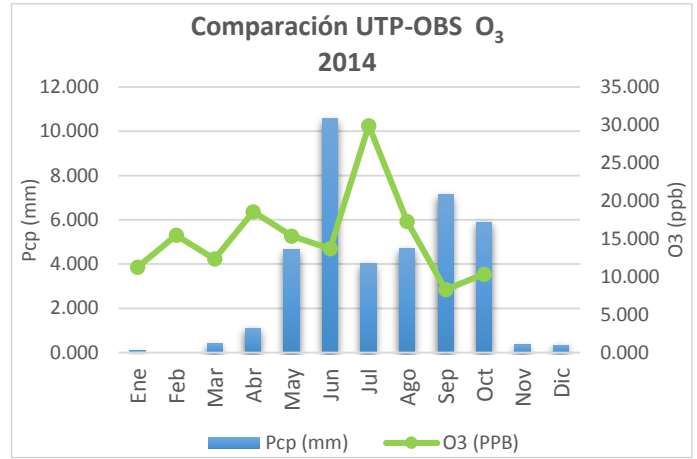
Gráfica 224 Comparación D de O₃ frente a Pcp 2013
Fuente: Elaboración propia



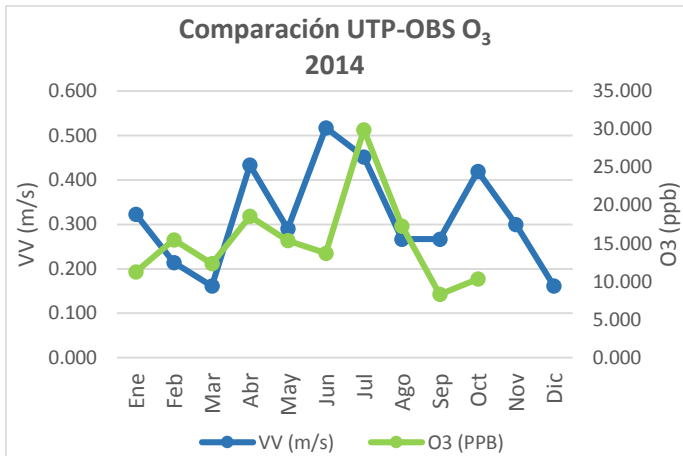
Gráfica 225 Comparación D de O₃ frente a VV 2013
Fuente: Elaboración propia



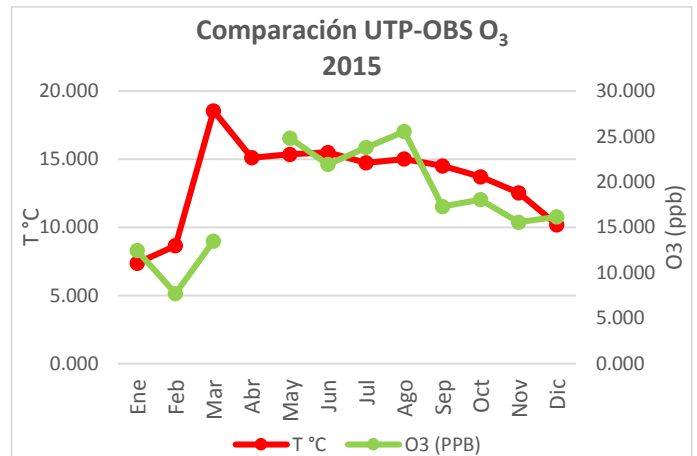
Gráfica 226 Comparación D de O₃ frente a T °C 2014
Fuente: Elaboración propia



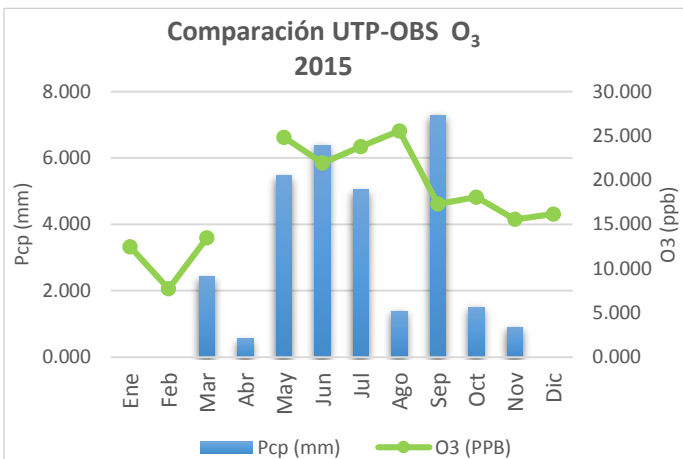
Gráfica 227 Comparación D de O₃ frente a Pcp 2014
Fuente: Elaboración propia



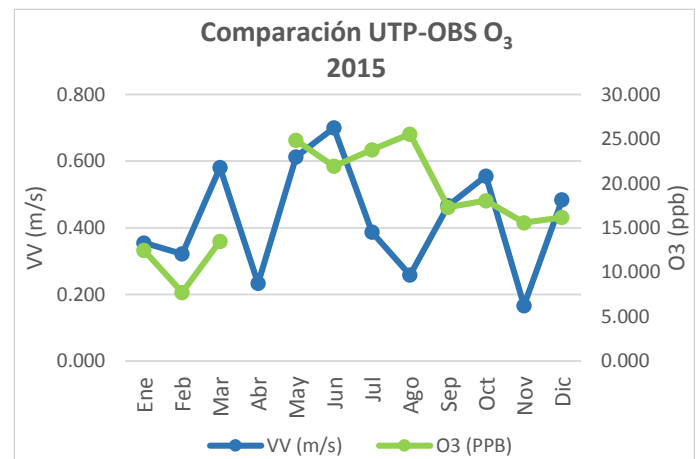
Gráfica 228 Comparación D de O₃ frente a VV 2015
Fuente: Elaboración propia



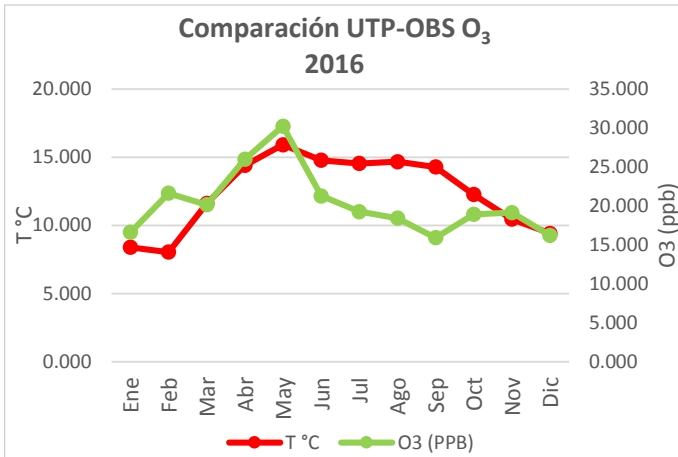
Gráfica 229 Comparación D de O₃ frente a T °C 2015
Fuente: Elaboración propia



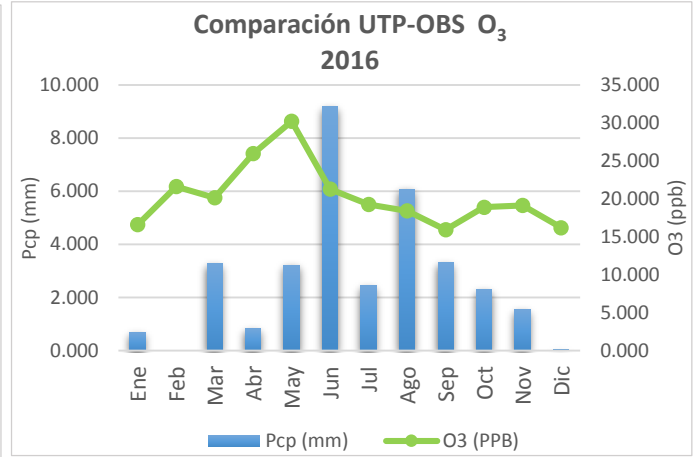
Gráfica 230 Comparación D de O₃ frente a Pcp 2015
Fuente: Elaboración propia



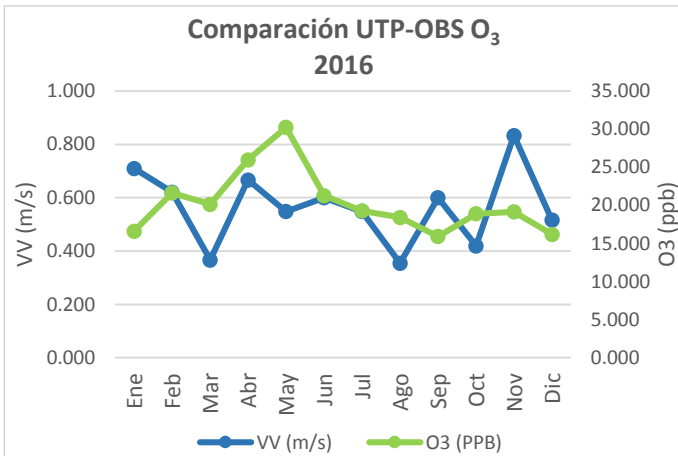
Gráfica 231 Comparación D de O₃ frente a VV 2015
Fuente: Elaboración propia



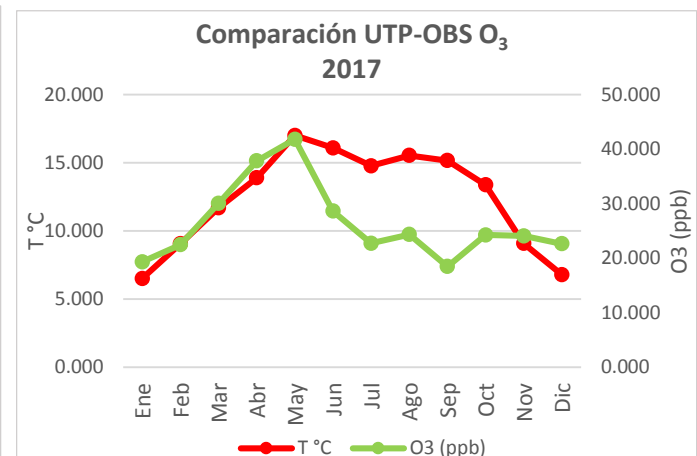
Gráfica 232 Comparación D de O₃ frente a T°C 2016
Fuente: Elaboración propia



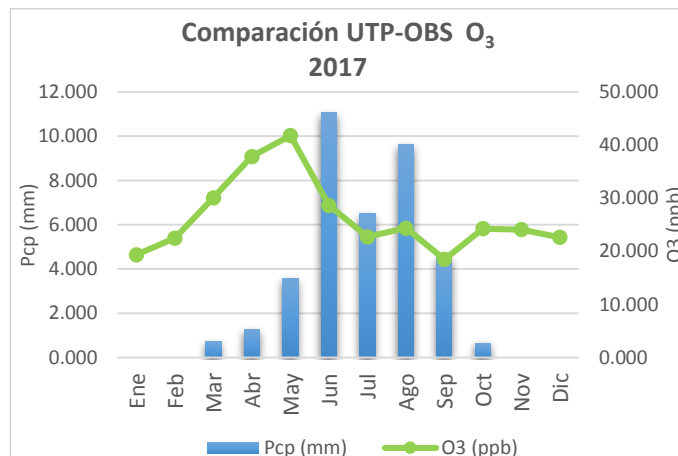
Gráfica 233 Comparación D de O₃ frente a Pcp 2016
Fuente: Elaboración propia



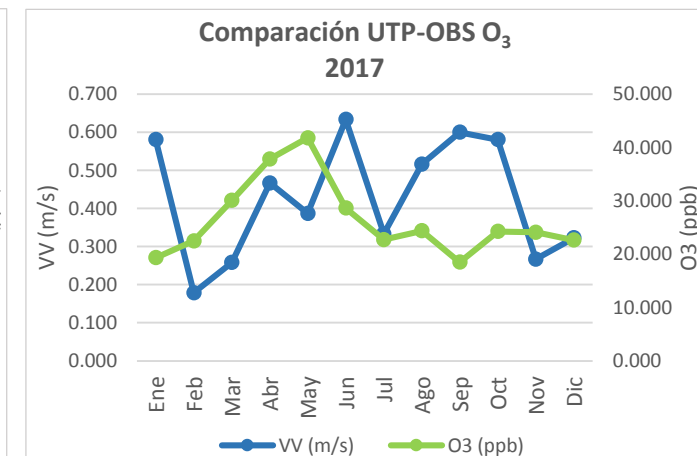
Gráfica 234 Comparación D de O₃ frente a Pcp 2016
Fuente: Elaboración propia



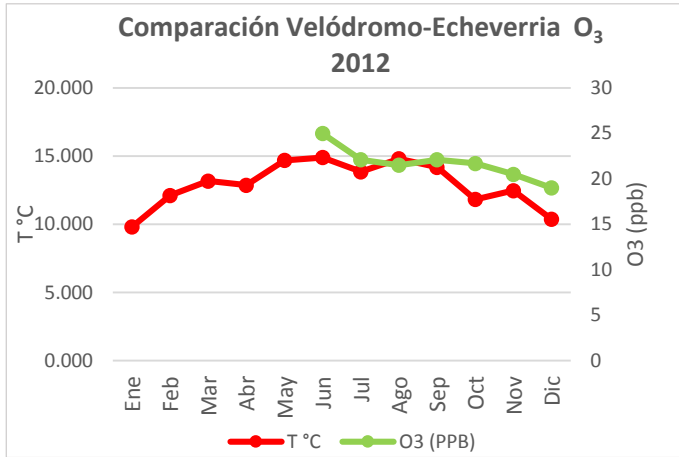
Gráfica 235 Comparación D de O₃ frente a T°C 2017
Fuente: Elaboración propia



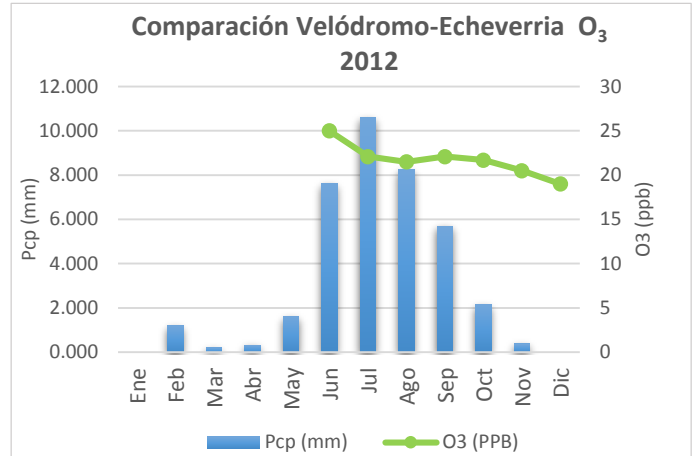
Gráfica 236 Comparación D de O₃ frente a Pcp 2017
Fuente: Elaboración propia



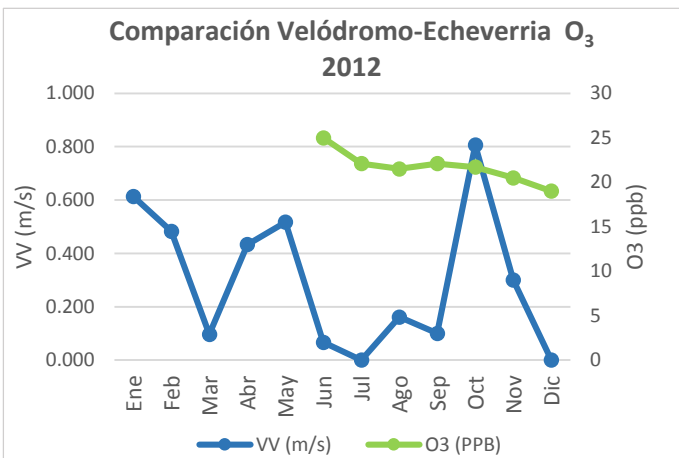
Gráfica 237 Comparación D de O₃ frente a VV 2017
Fuente: Elaboración propia



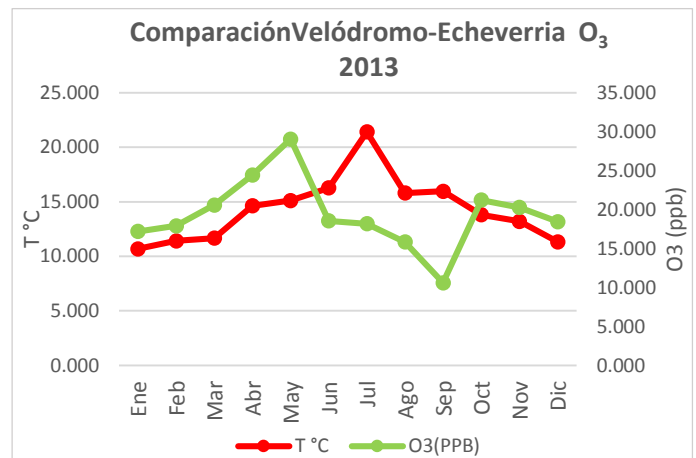
Gráfica 238 Comparación E de O₃ frente a T°C 2012
Fuente: Elaboración propia



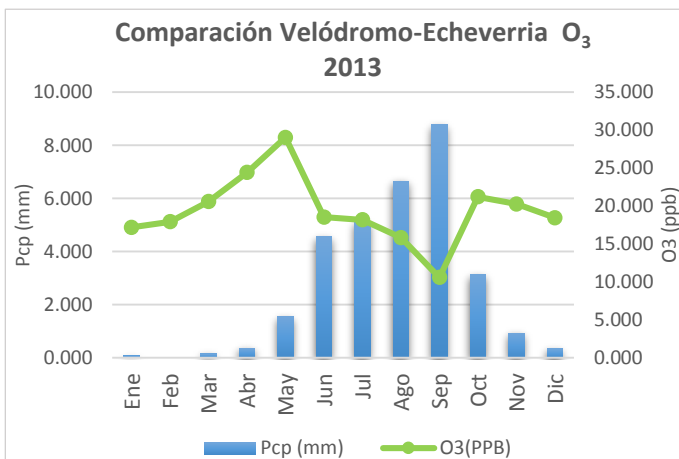
Gráfica 239 Comparación E de O₃ frente a Pcp 2012
Fuente: Elaboración propia



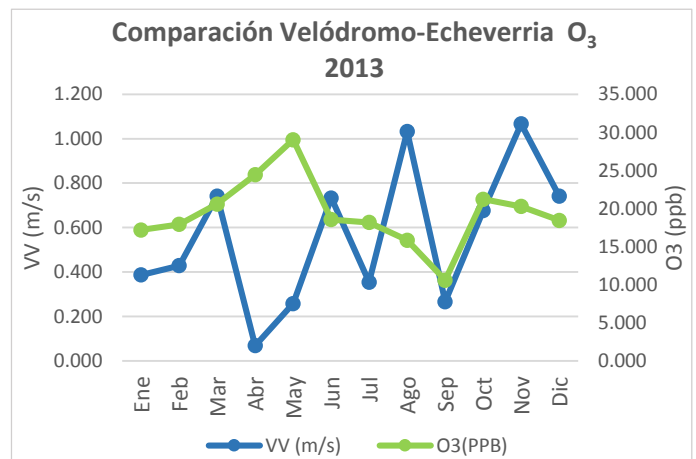
Gráfica 240 Comparación E de O₃ frente a VV 2012
Fuente: Elaboración propia



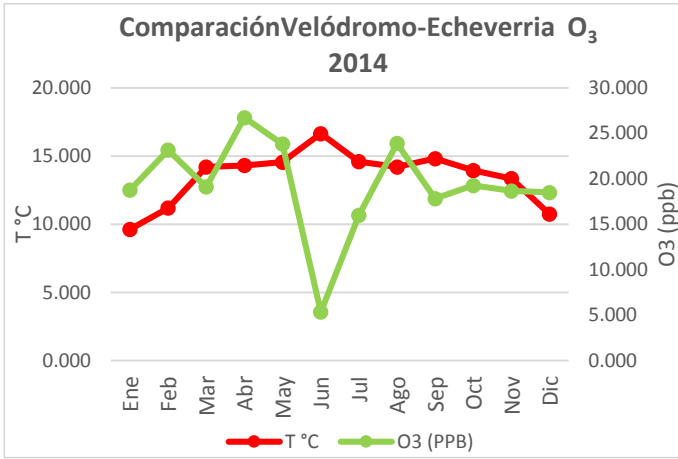
Gráfica 241 Comparación E de O₃ frente a T°C 2013
Fuente: Elaboración propia



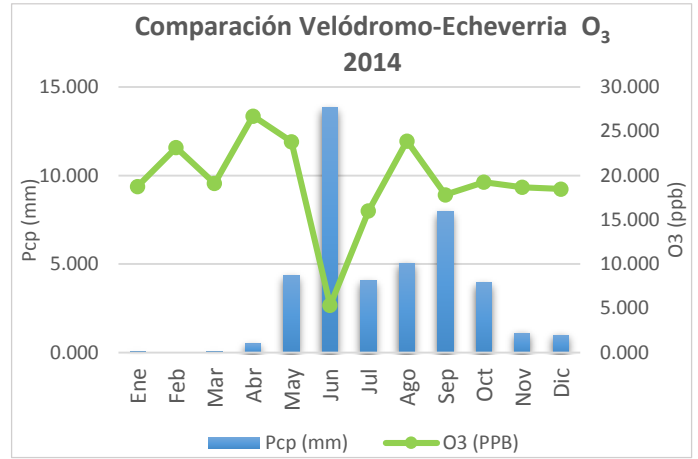
Gráfica 242 Comparación E de O₃ frente a Pcp 2013
Fuente: Elaboración propia



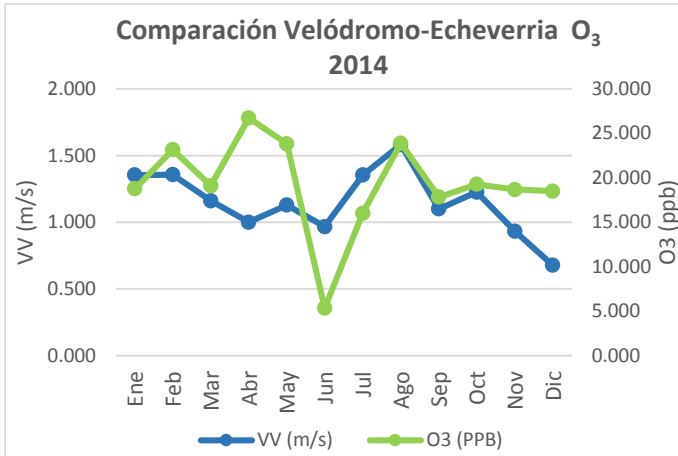
Gráfica 243 Comparación E de O₃ frente a VV 2013
Fuente: Elaboración propia



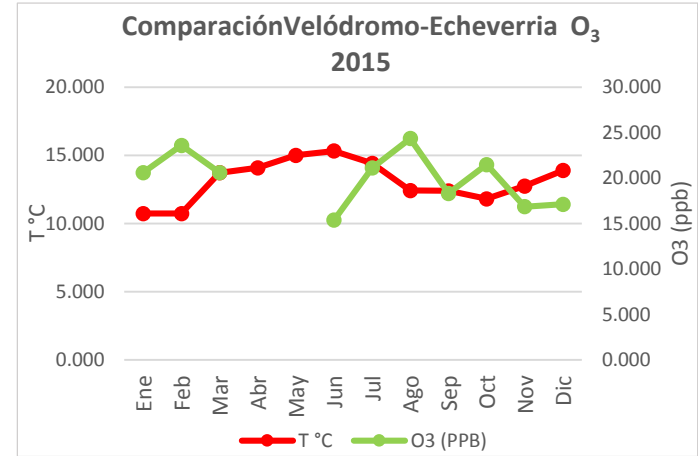
Gráfica 244 Comparación E de O₃ frente a T°C 2014
Fuente: Elaboración propia



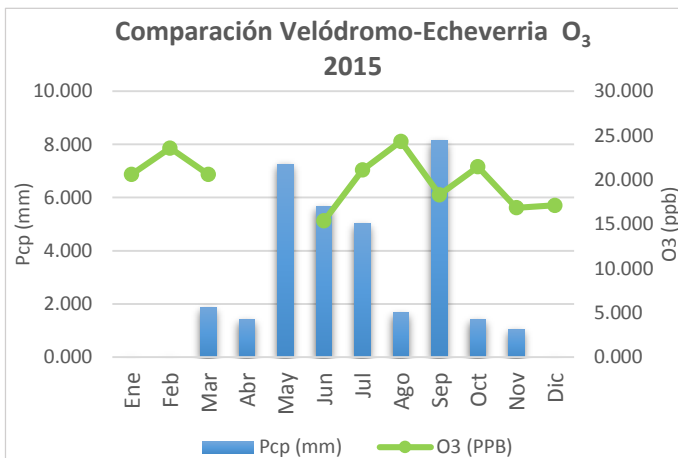
Gráfica 245 Comparación E de O₃ frente a Pcp 2014
Fuente: Elaboración propia



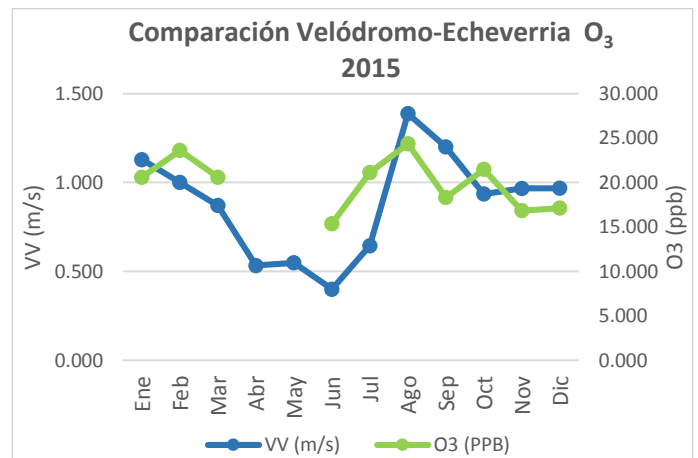
Gráfica 246 Comparación E de O₃ frente a VV 2014
Fuente: Elaboración propia



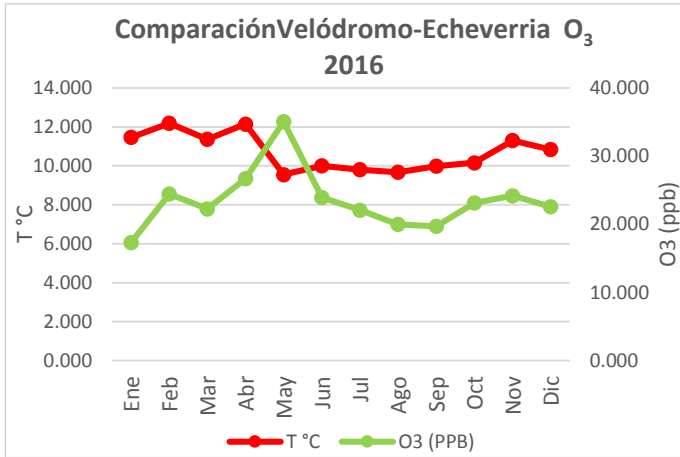
Gráfica 247 Comparación E de O₃ frente a T°C 2015
Fuente: Elaboración propia



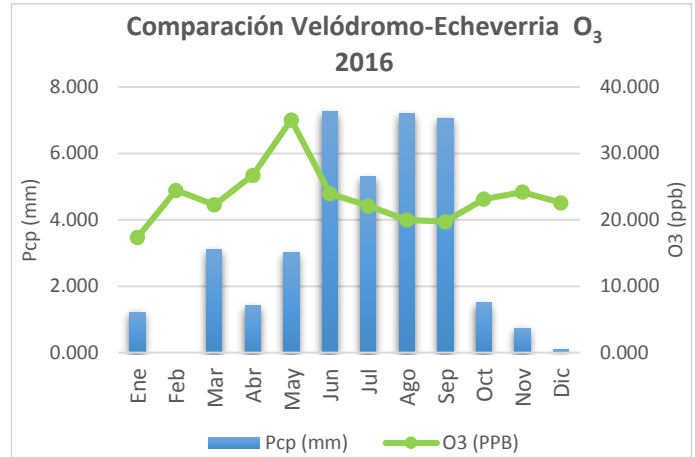
Gráfica 248 Comparación E de O₃ frente a Pcp 2015
Fuente: Elaboración propia



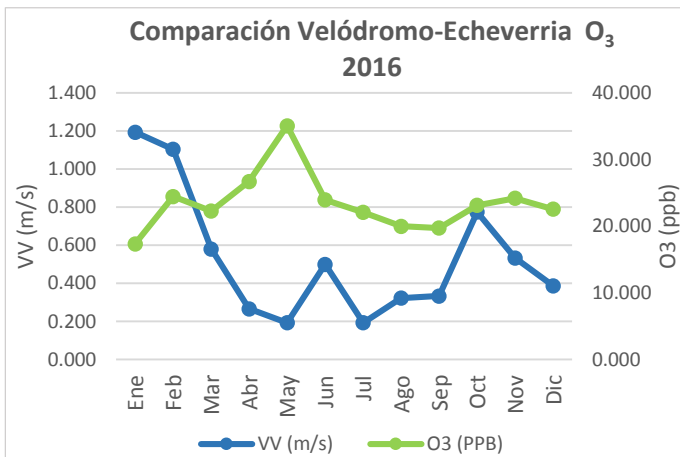
Gráfica 249 Comparación E de O₃ frente a VV 2015
Fuente: Elaboración propia



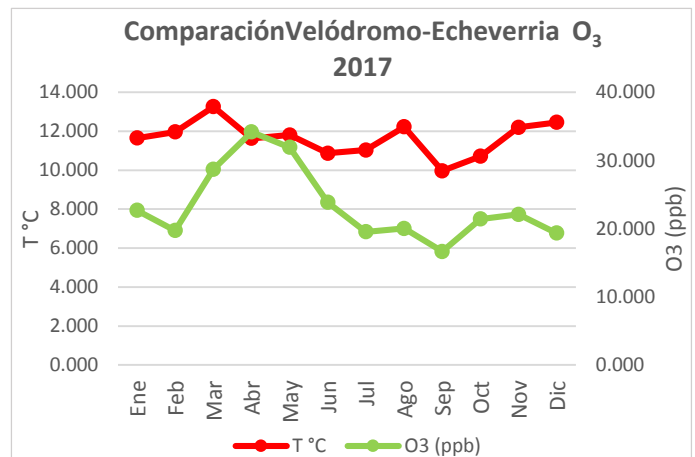
Gráfica 250 Comparación E de O₃ frente a T°C 2016
Fuente: Elaboración propia



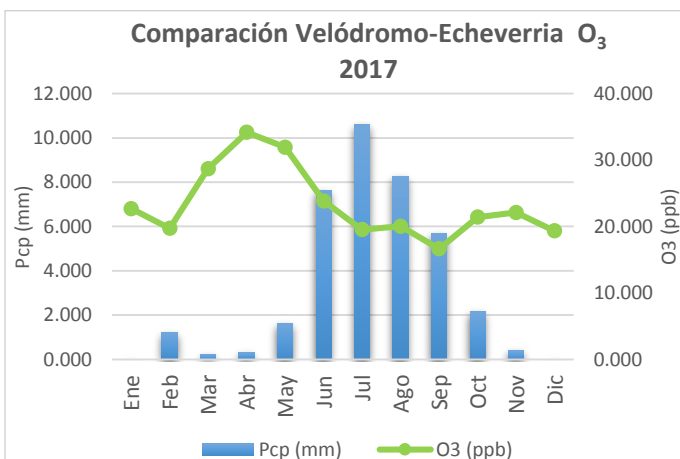
Gráfica 251 Comparación E de O₃ frente a T°C 2016
Fuente: Elaboración propia



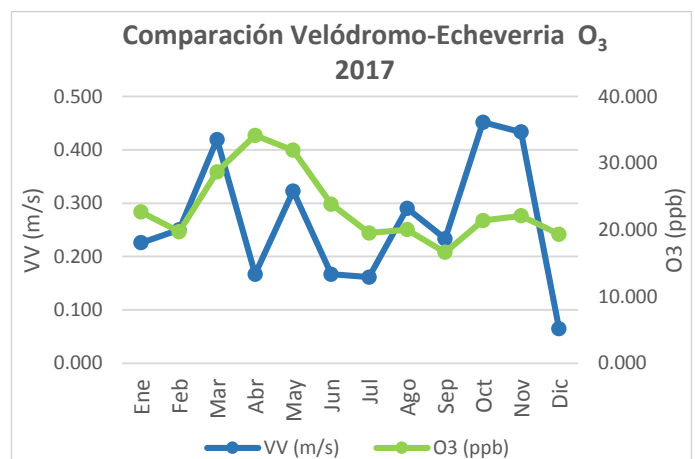
Gráfica 252 Comparación E de O₃ frente a VV 2016
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 253 Comparación E de O₃ frente a T°C 2017
Fuente: Elaboración propia

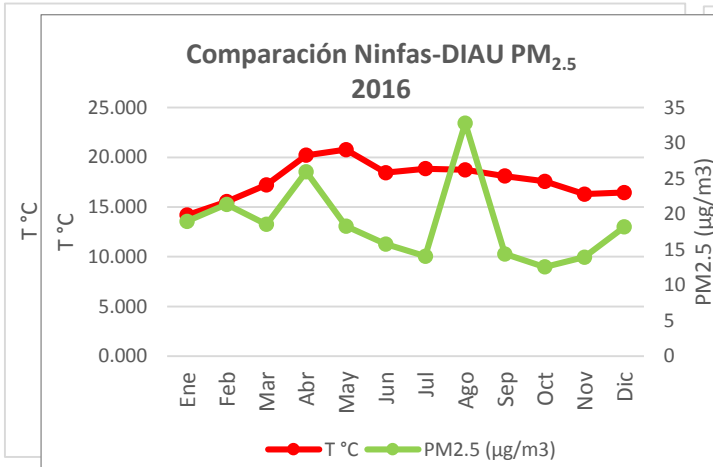


Gráfica 254 Comparación E de O₃ frente a Pcp 2017
Fuente: Elaboración propia

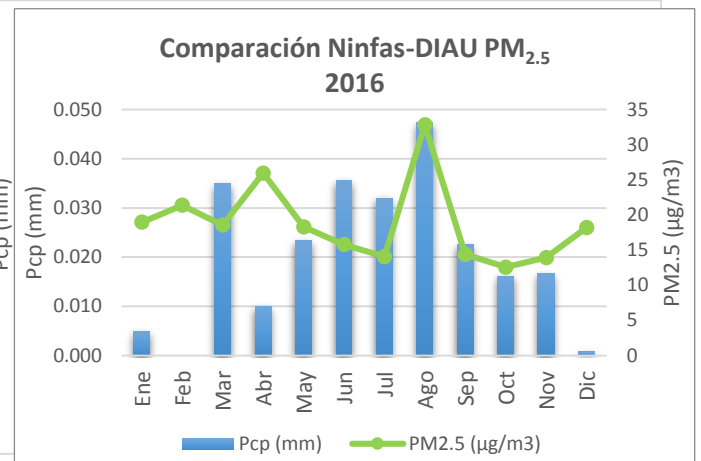


Gráfica 255 Comparación E de O₃ frente a VV 2017
Fuente: Elaboración propia

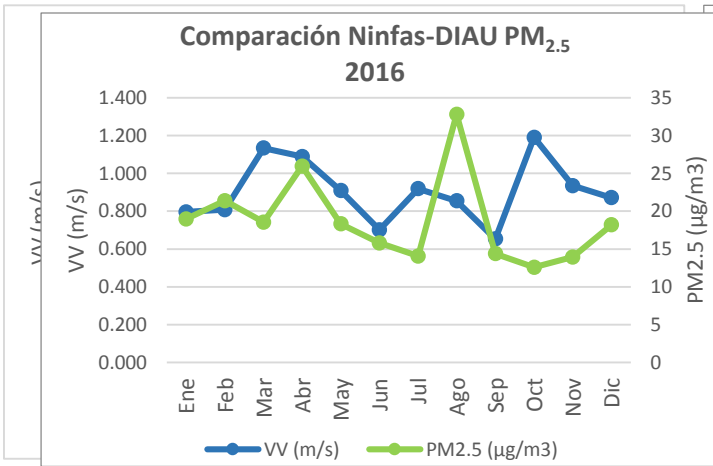
Material Particulado (PM)



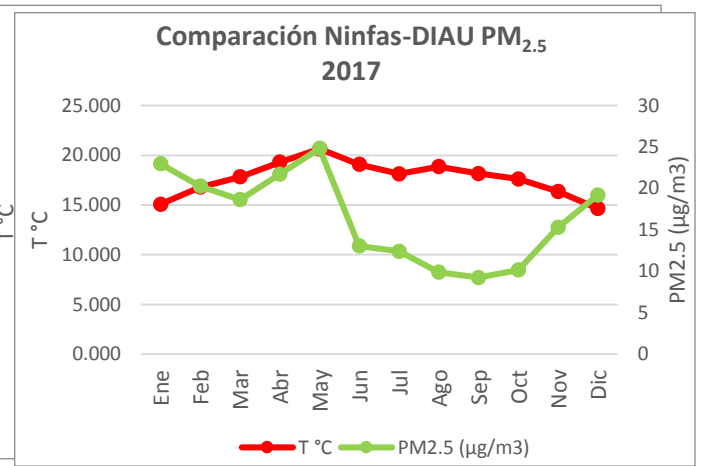
Gráfica 262 Comparación A de PM_{2.5} frente a T °C 2016
Fuente: Elaboración propia



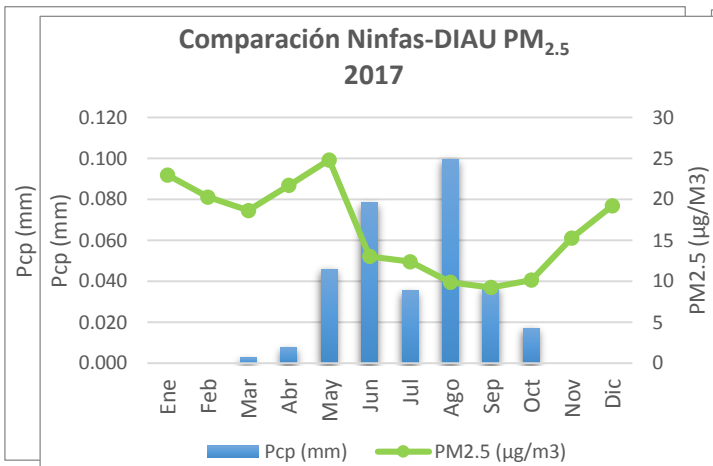
Gráfica 263 Comparación A de PM_{2.5} frente a Pcp 2016
Fuente: Elaboración propia



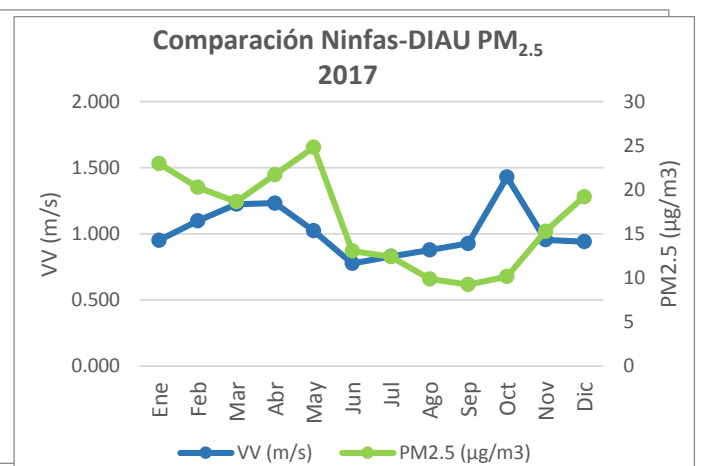
Gráfica 264 Comparación A de PM_{2.5} frente a Pcp 2016
Fuente: Elaboración propia



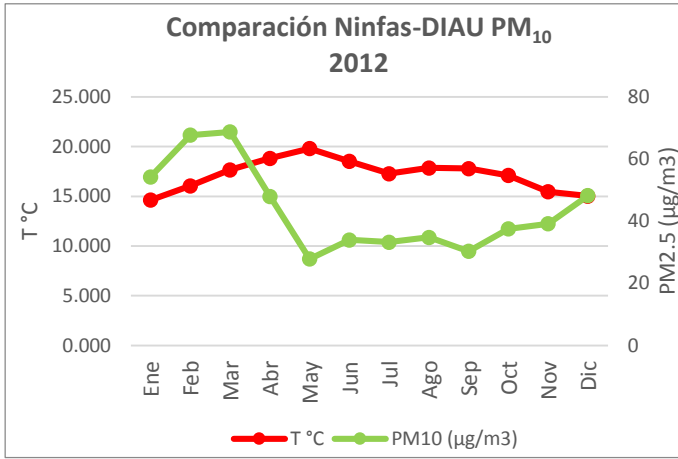
Gráfica 265 Comparación A de PM_{2.5} frente a T °C 2017
Fuente: Elaboración propia



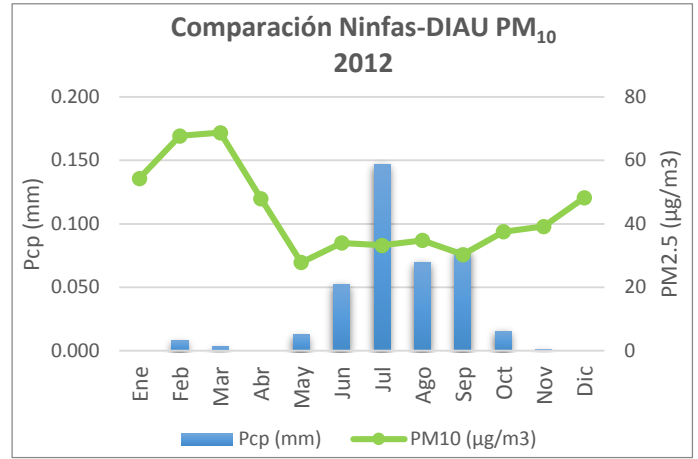
Gráfica 266 Comparación A de PM_{2.5} frente a Pcp 2017
Fuente: Elaboración propia



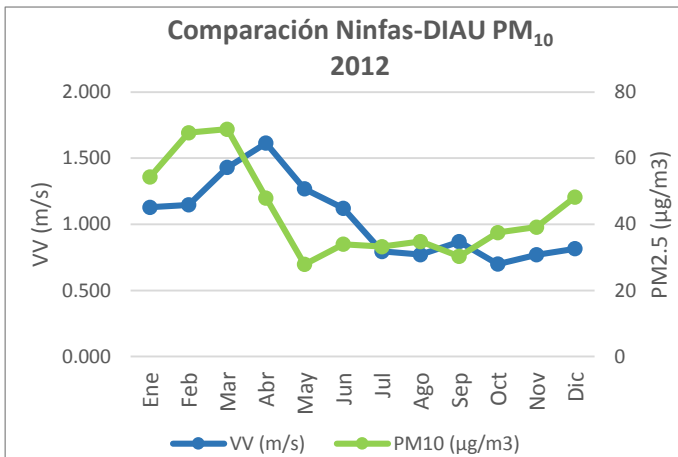
Gráfica 267 Comparación A de PM_{2.5} frente a Pcp 2017
Fuente: Elaboración propia



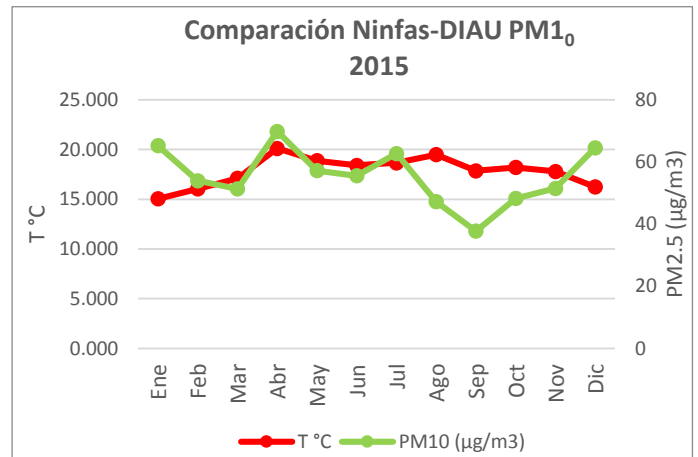
Gráfica 268 Comparación A de PM₁₀ frente a T °C 2012
Fuente: Elaboración propia



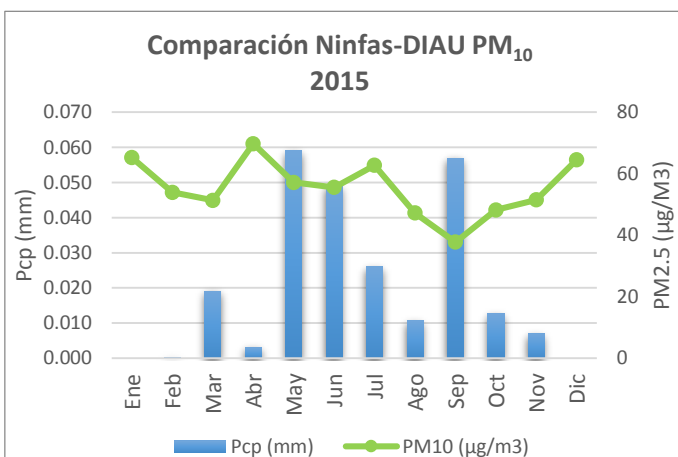
Gráfica 269 Comparación A de PM₁₀ frente a Pcp 2012
Fuente: Elaboración propia



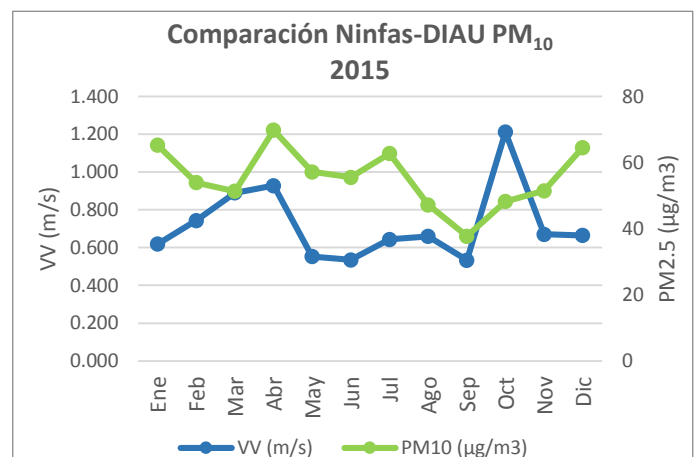
Gráfica 270 Comparación A de PM₁₀ frente a VV 2012
Fuente: Elaboración propia



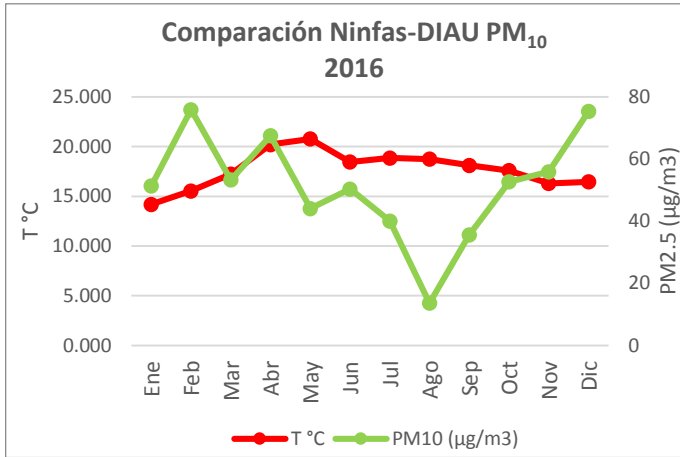
Gráfica 271 Comparación A de PM₁₀ frente a T °C 2015
Fuente: Elaboración propia



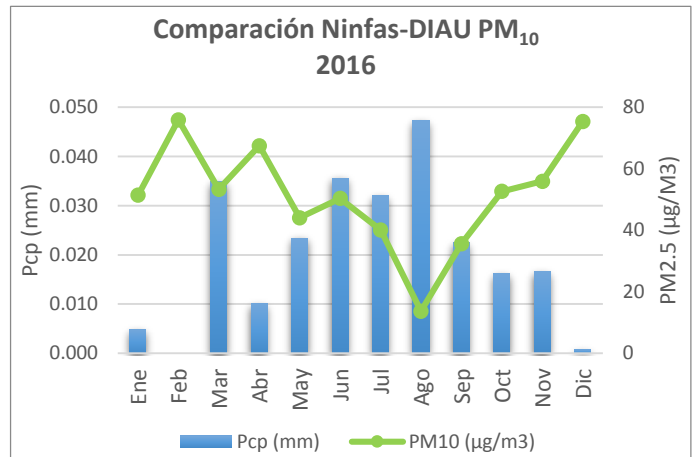
Gráfica 272 Comparación A de PM₁₀ frente a Pcp 2015
Fuente: Elaboración propia



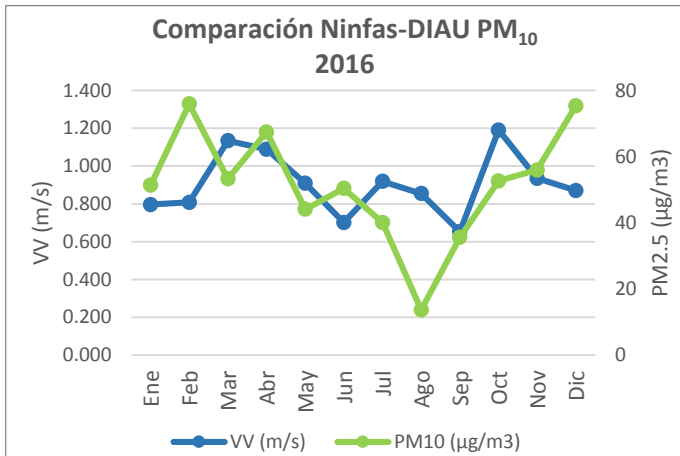
Gráfica 273 Comparación A de PM₁₀ frente a VV 2015
Fuente: Elaboración propia



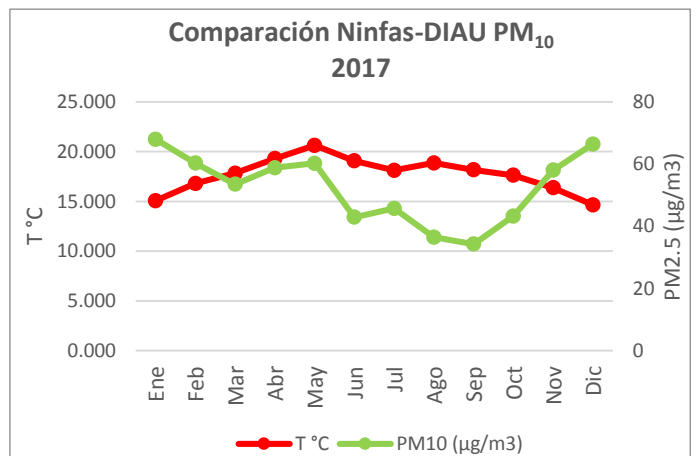
Gráfica 274 Comparación A de PM₁₀ frente a T °C 2016
Fuente: Elaboración propia



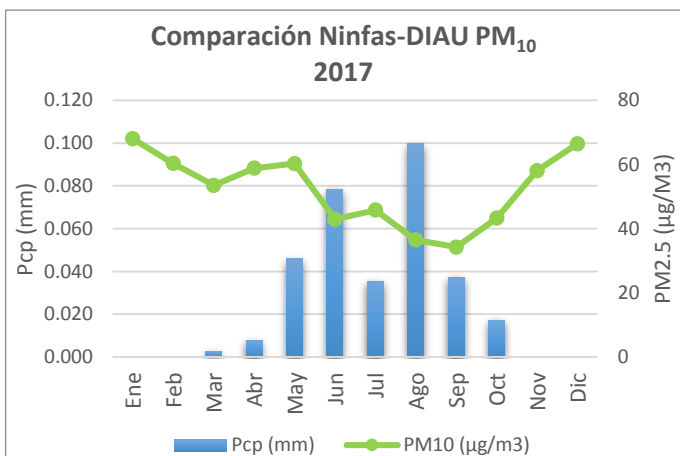
Gráfica 275 Comparación A de PM₁₀ frente a Pcp 2016
Fuente: Elaboración propia



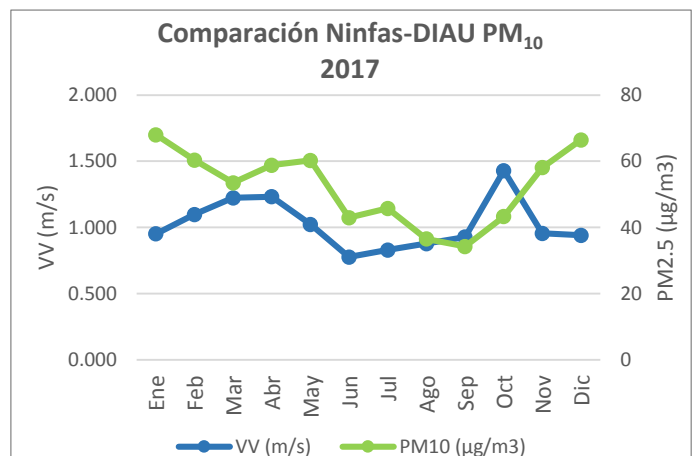
Gráfica 276 Comparación A de PM₁₀ frente a VV 2016
Fuente: Elaboración propia



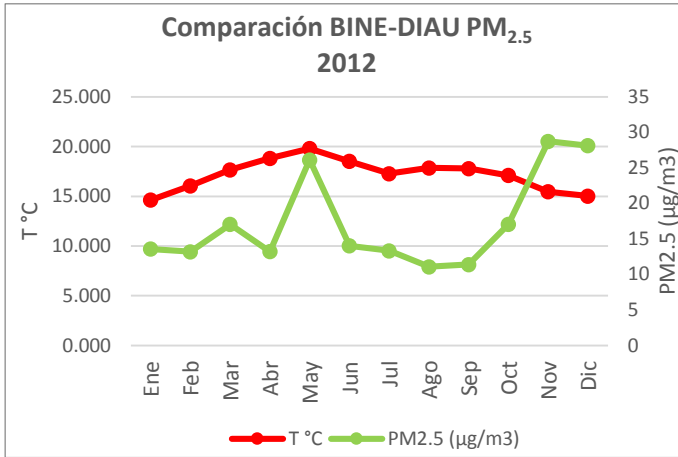
Gráfica 277 Comparación A de PM₁₀ frente a T °C 2017
Fuente: Elaboración propia



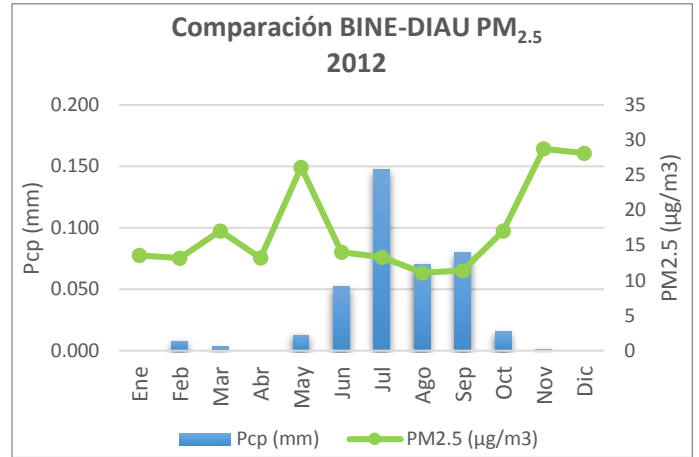
Gráfica 278 Comparación A de PM₁₀ frente a Pcp 2017
Fuente: Elaboración propia



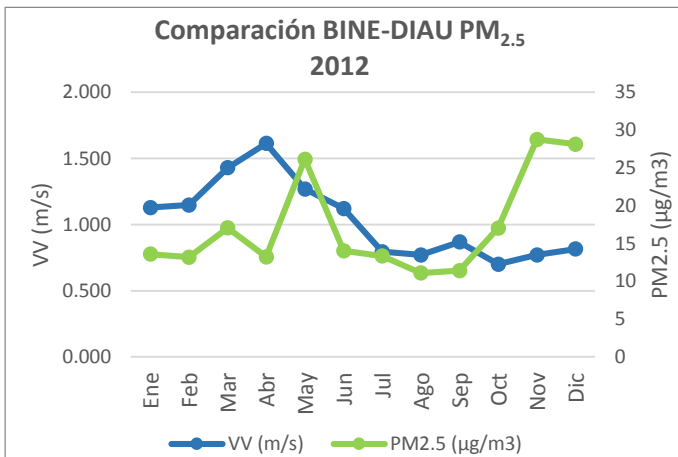
Gráfica 279 Comparación A de PM₁₀ frente a VV 2017
Fuente: Elaboración propia



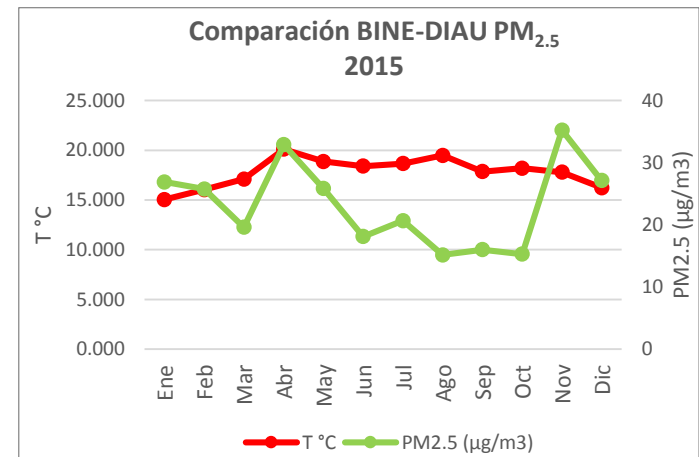
Gráfica 280 Comparación B de PM_{2.5} frente a T °C 2012
Fuente: Elaboración propia



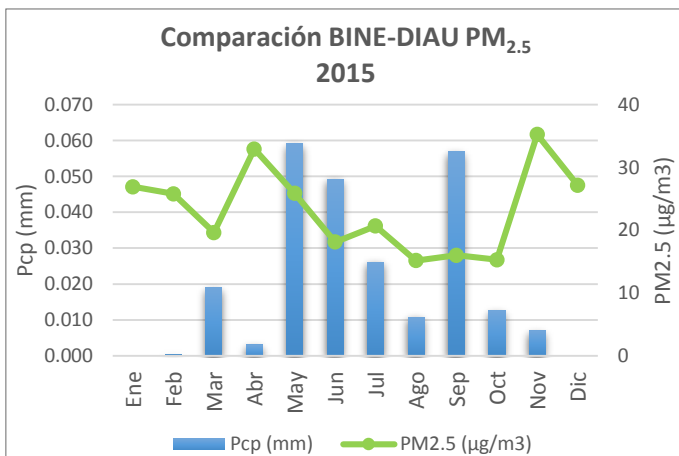
Gráfica 281 Comparación B de PM_{2.5} frente a Pcp 2012
Fuente: Elaboración propia



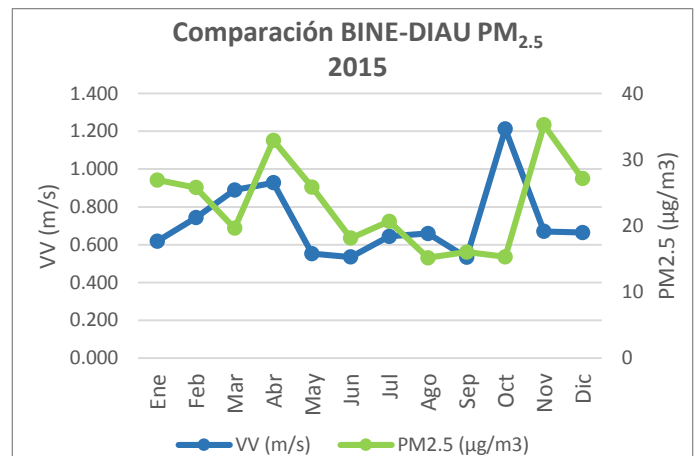
Gráfica 282 Comparación B de PM_{2.5} frente a VV 2012
Fuente: Elaboración propia



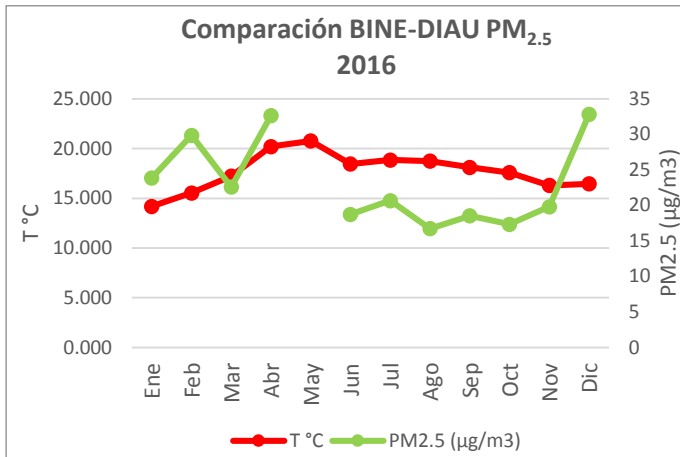
Gráfica 283 Comparación B de PM_{2.5} frente a T °C 2015
Fuente: Elaboración propia



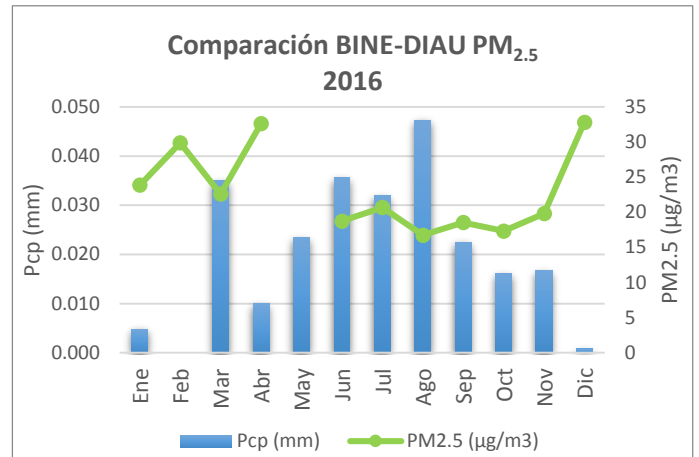
Gráfica 284 Comparación B de PM_{2.5} frente a Pcp 2015
Fuente: Elaboración propia



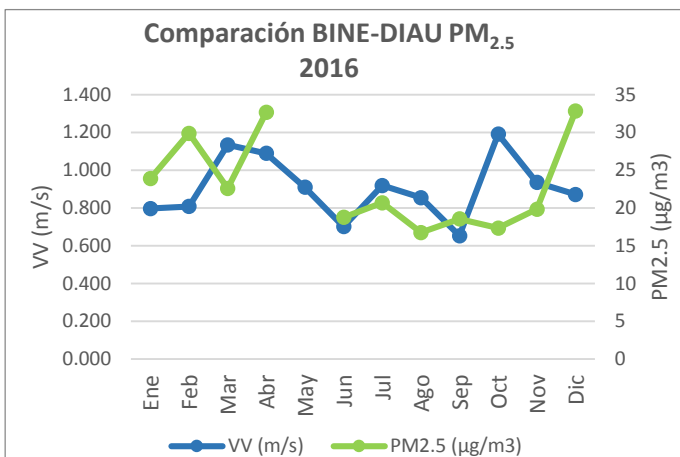
Gráfica 285 Comparación B de PM_{2.5} frente a VV 2015
Fuente: Elaboración propia



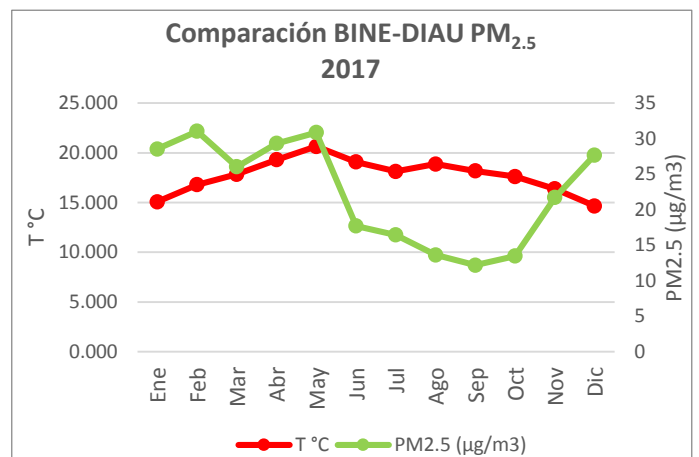
Gráfica 286 Comparación B de PM_{2.5} frente a T °C 2016
Fuente: Elaboración propia



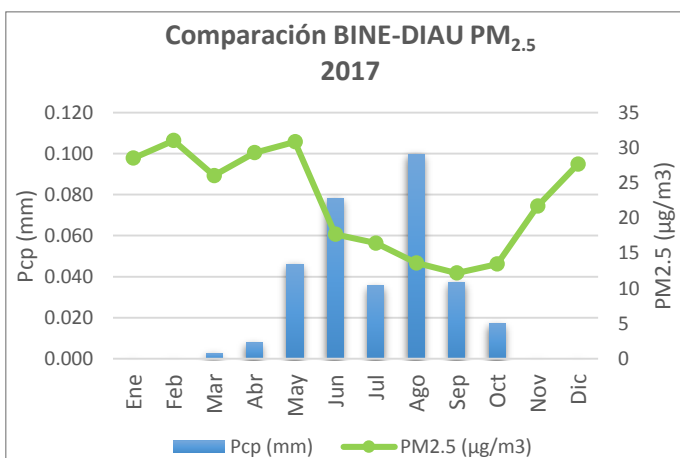
Gráfica 287 Comparación B de PM_{2.5} frente a Pcp 2016
Fuente: Elaboración propia



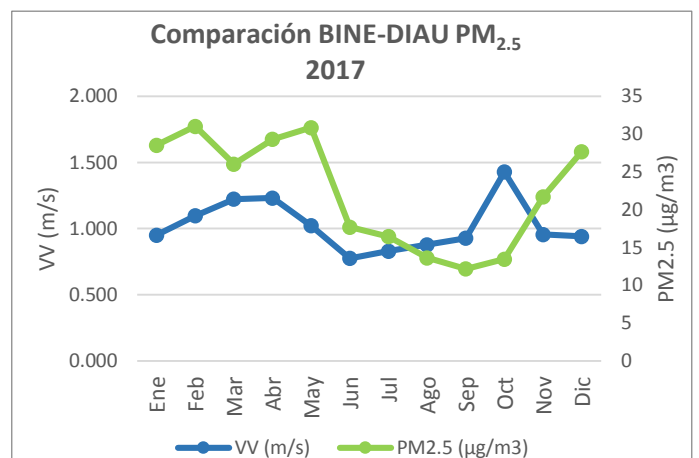
Gráfica 288 Comparación B de PM_{2.5} frente a VV 2016
Fuente: Elaboración propia



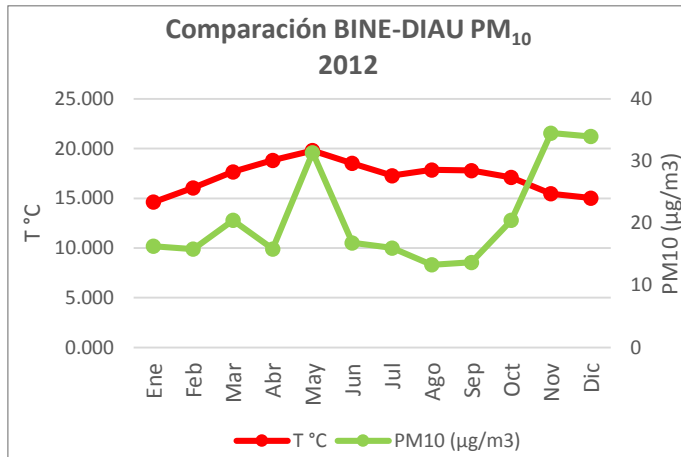
Gráfica 289 Comparación B de PM_{2.5} frente a T °C 2017
Fuente: Elaboración propia



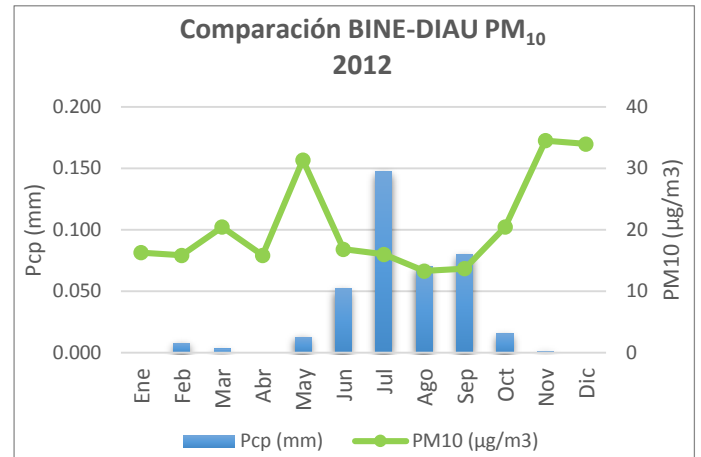
Gráfica 290 Comparación B de PM_{2.5} frente a Pcp 2017
Fuente: Elaboración propia



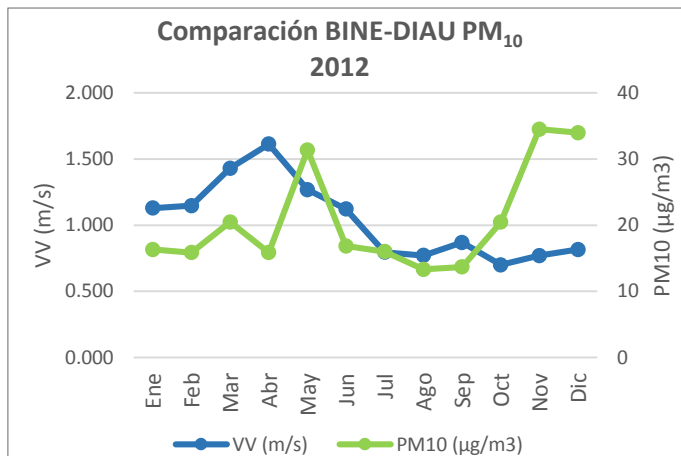
Gráfica 291 Comparación B de PM_{2.5} frente a VV 2017
Fuente: Elaboración propia



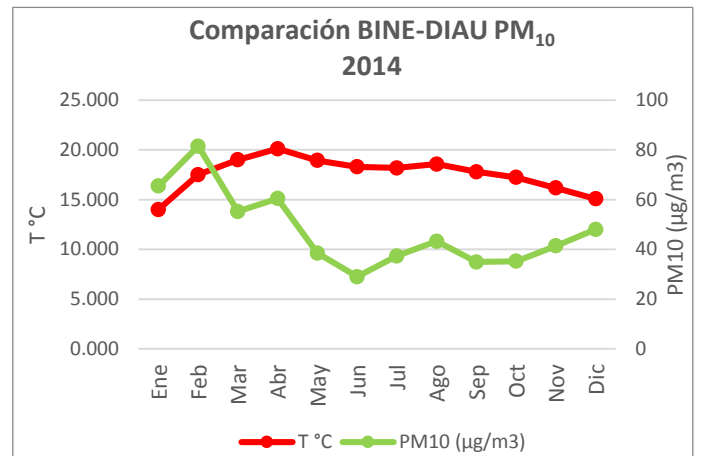
Gráfica 292 Comparación B de PM₁₀ frente a T °C 2012
Fuente: Elaboración propia



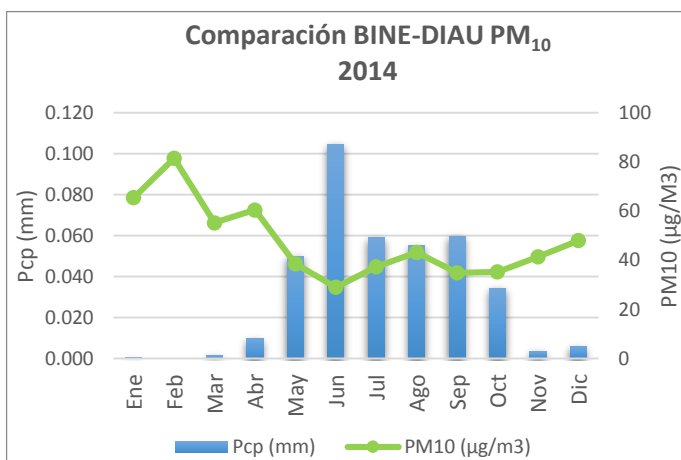
Gráfica 293 Comparación B de PM₁₀ frente a Pcp 2012
Fuente: Elaboración propia



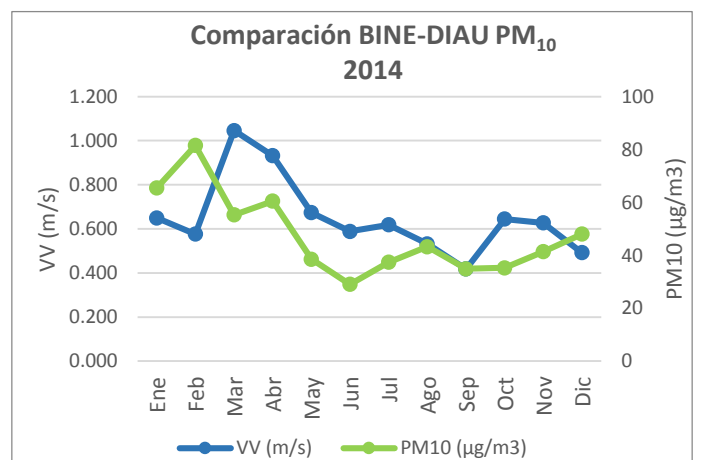
Gráfica 294 Comparación B de PM₁₀ frente a VV 2012
Fuente: Elaboración propia



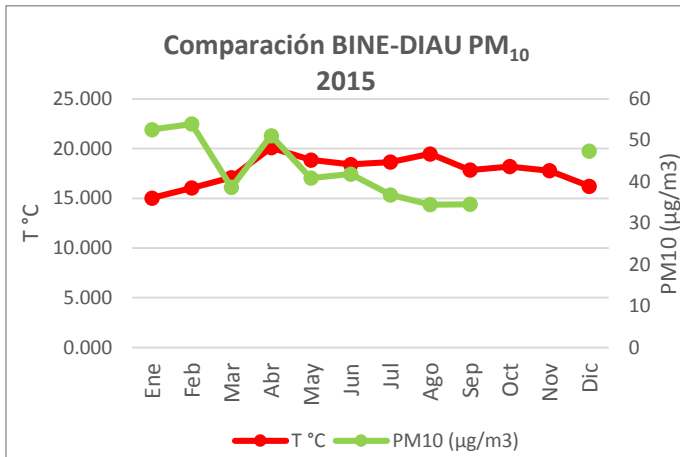
Gráfica 295 Comparación B de PM₁₀ frente a T °C 2014
Fuente: Elaboración propia



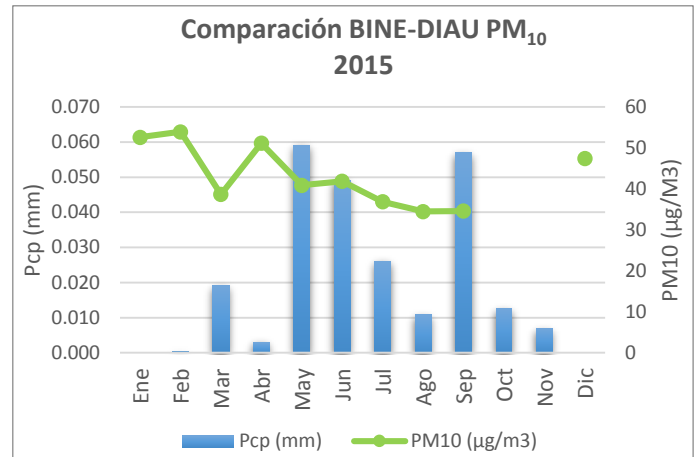
Gráfica 296 Comparación B de PM₁₀ frente a Pcp 2014
Fuente: Elaboración propia



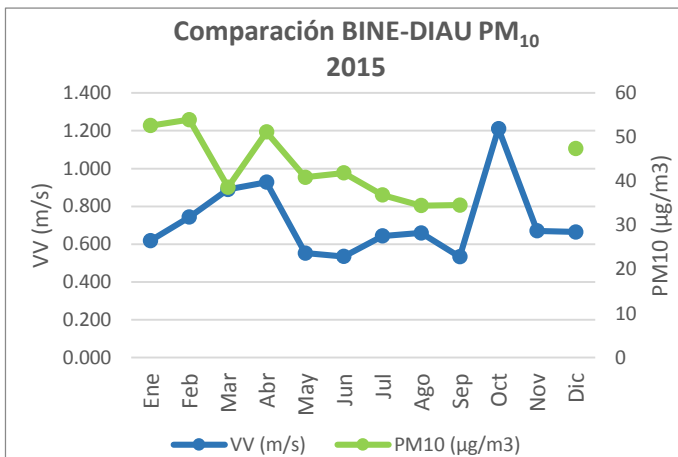
Gráfica 297 Comparación B de PM₁₀ frente a VV 2014
Fuente: Elaboración propia



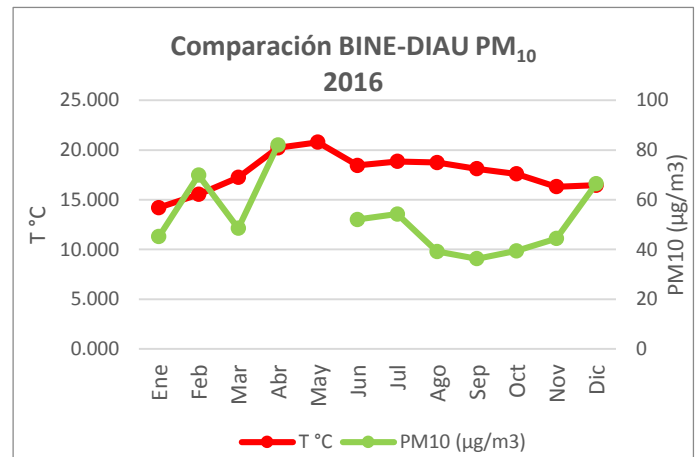
Gráfica 298 Comparación B de PM₁₀ frente a T °C 2015
Fuente: Elaboración propia



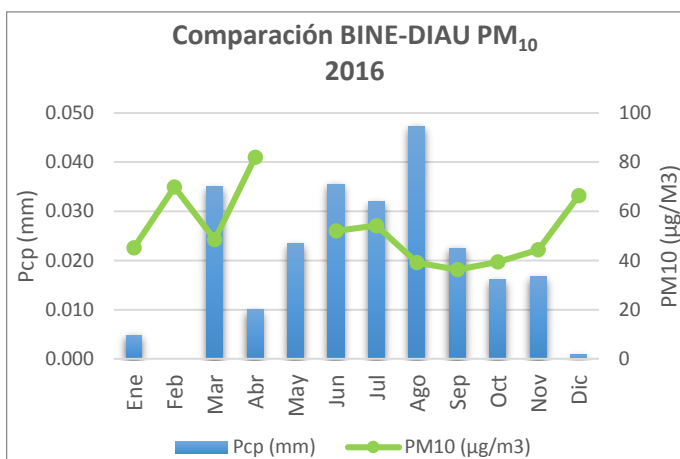
Gráfica 299 Comparación B de PM₁₀ frente a Pcp 2015
Fuente: Elaboración propia



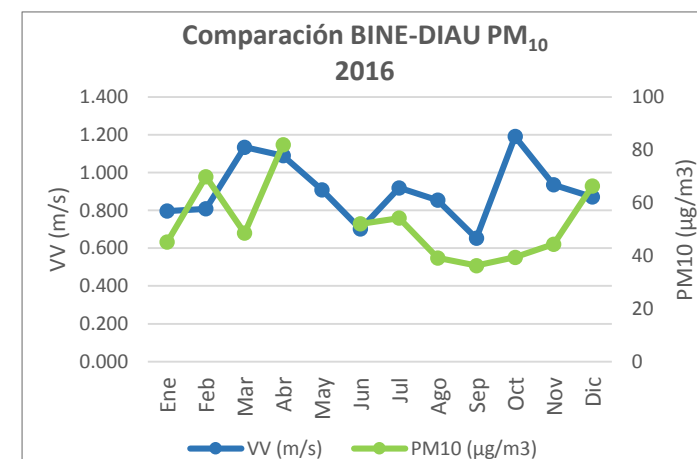
Gráfica 300 Comparación B de PM₁₀ frente a VV 2015
Fuente: Elaboración propia



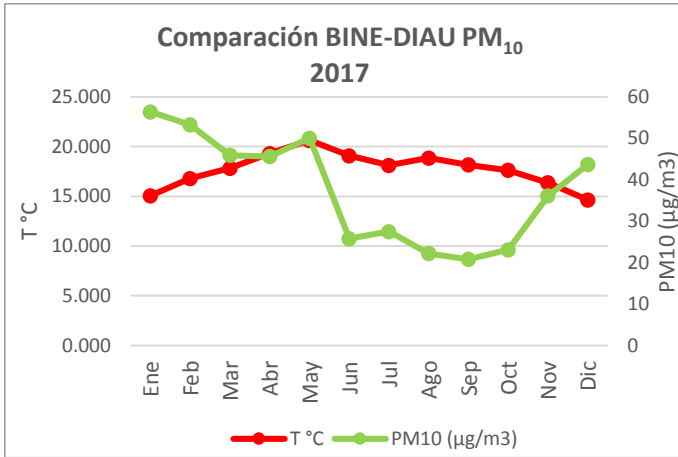
Gráfica 301 Comparación B de PM₁₀ frente a T °C 2016
Fuente: Elaboración propia



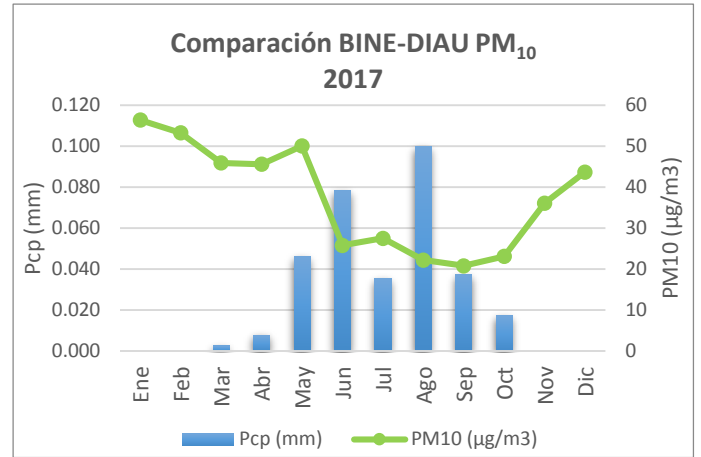
Gráfica 302 Comparación B de PM₁₀ frente a Pcp 2016
Fuente: Elaboración propia



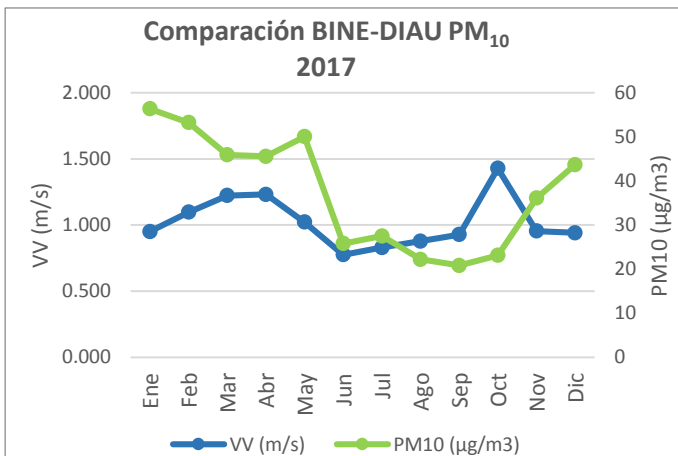
Gráfica 303 Comparación B de PM₁₀ frente a VV 2016
Fuente: Elaboración propia



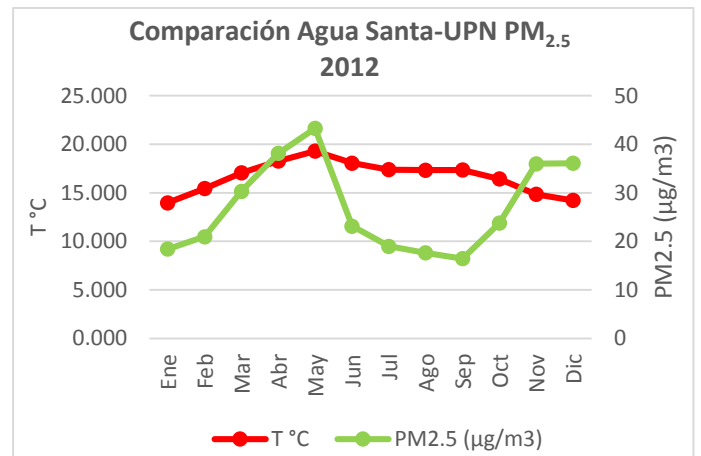
Gráfica 304 Comparación B de PM₁₀ frente a T °C 2017
Fuente: Elaboración propia



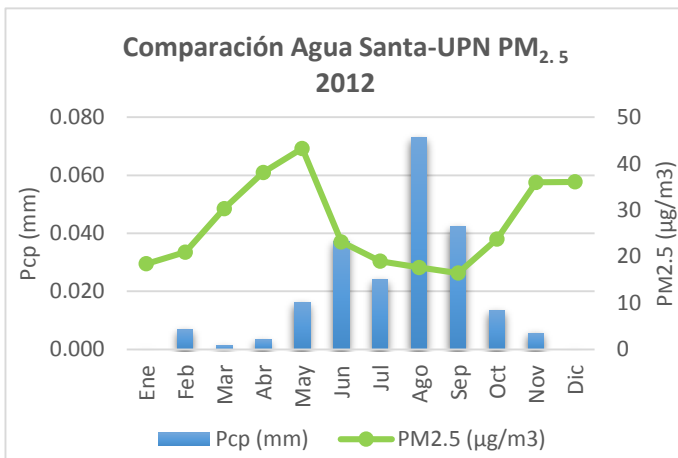
Gráfica 305 Comparación B de PM₁₀ frente a Pcp 2017
Fuente: Elaboración propia



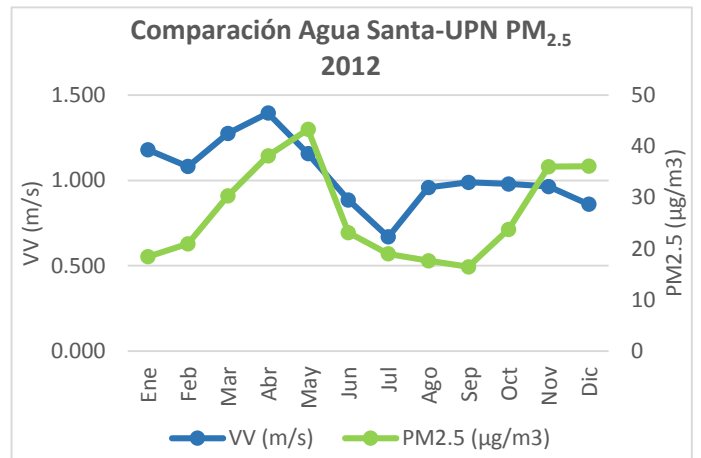
Gráfica 306 Comparación B de PM₁₀ frente a VV 2017
Fuente: Elaboración propia



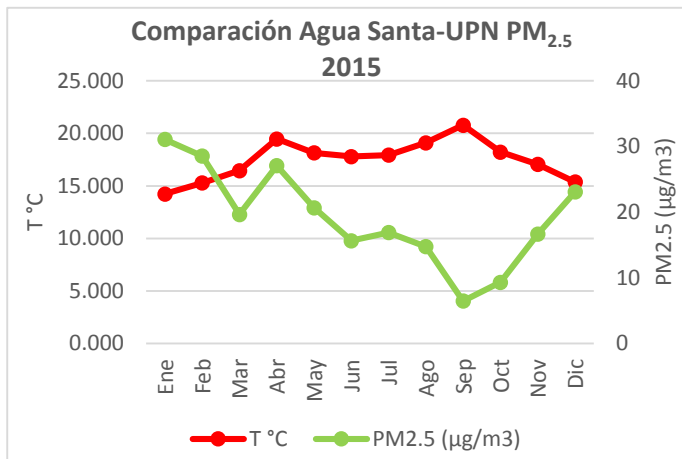
Gráfica 307 Comparación C de PM_{2.5} frente a T °C 2012
Fuente: Elaboración propia



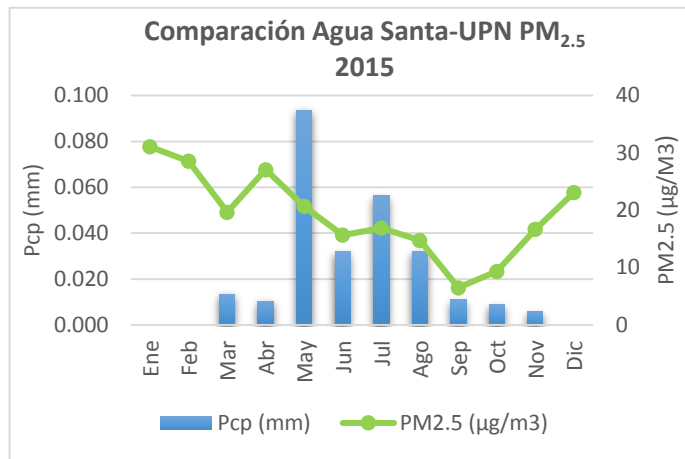
Gráfica 308 Comparación C de PM_{2.5} frente a Pcp 2012
Fuente: Elaboración propia



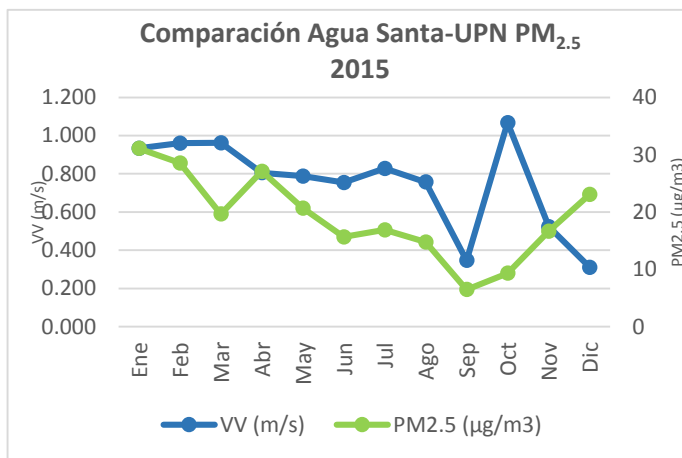
Gráfica 309 Comparación C de PM_{2.5} frente a VV 2012
Fuente: Elaboración propia



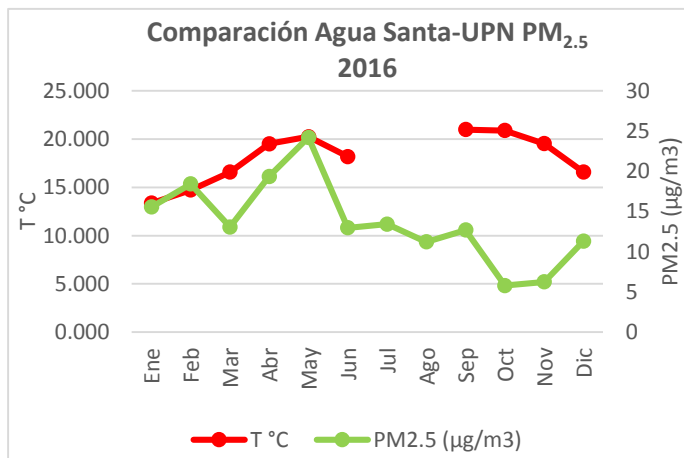
Gráfica 310 Comparación C de PM_{2.5} frente a T °C 2015
Fuente: Elaboración propia



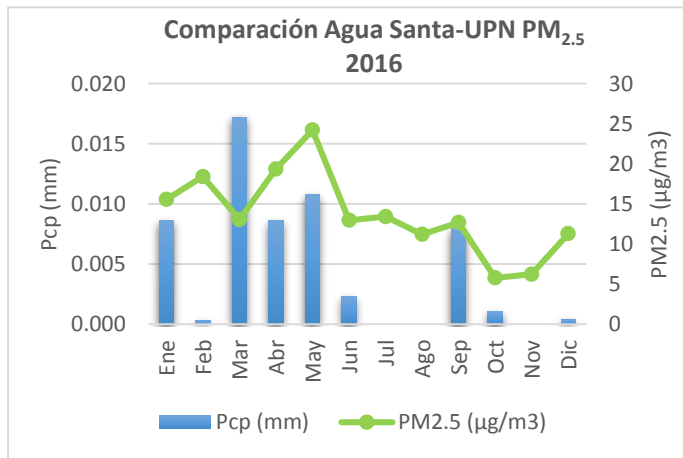
Gráfica 311 Comparación C de PM_{2.5} frente a Pcp 2015
Fuente: Elaboración propia



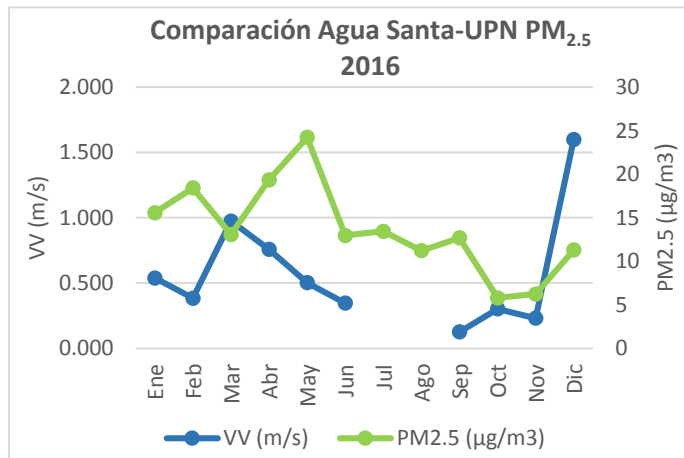
Gráfica 312 Comparación C de PM_{2.5} frente a VV 2015
Fuente: Elaboración propia



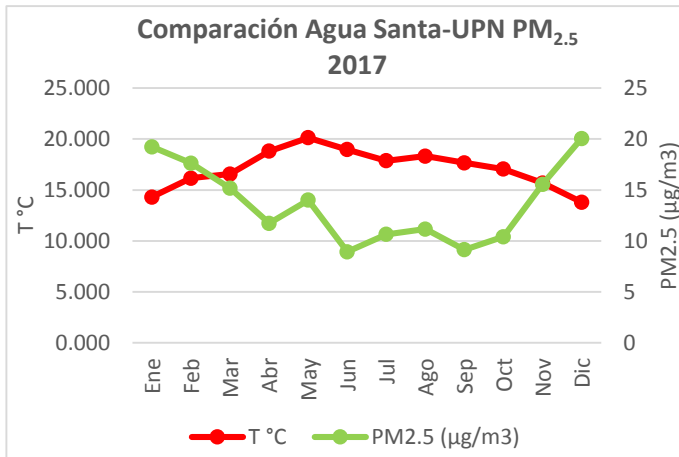
Gráfica 313 Comparación C de PM_{2.5} frente a T °C 2016
Fuente: Elaboración propia



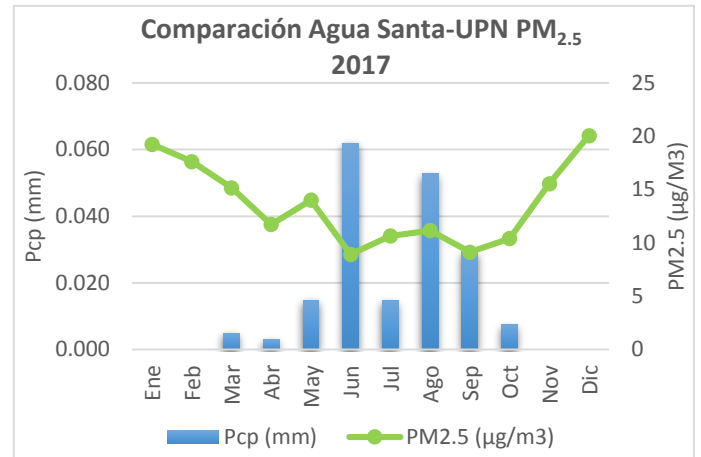
Gráfica 314 Comparación C de PM_{2.5} frente a Pcp 2016
Fuente: Elaboración propia



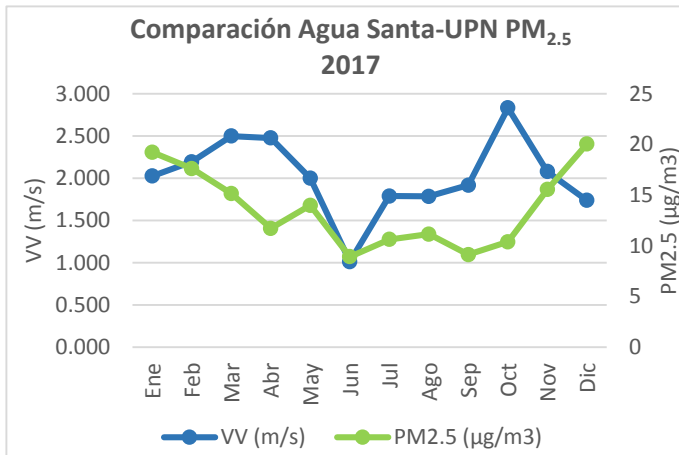
Gráfica 315 Comparación C de PM_{2.5} frente a Pcp 2016
Fuente: Elaboración propia



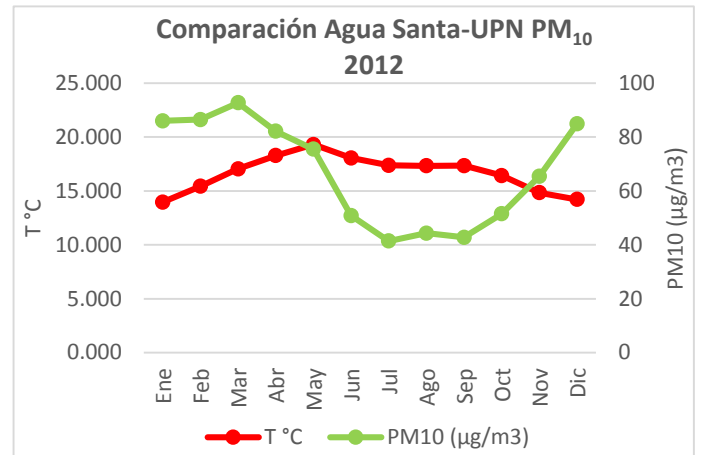
Gráfica 316 Comparación C de PM_{2.5} frente a T °C 2017
Fuente: Elaboración propia



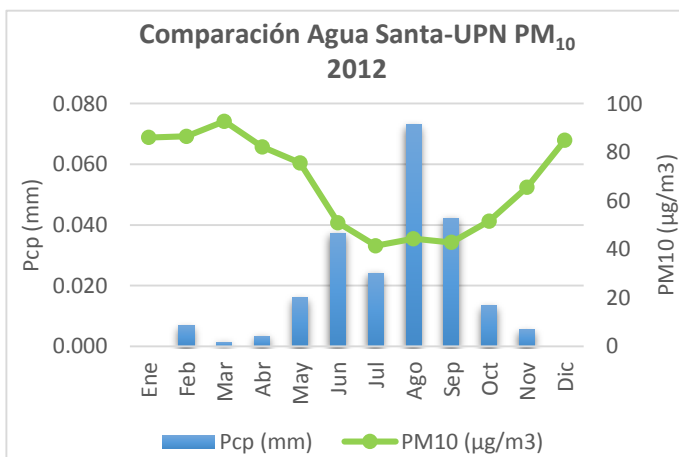
Gráfica 317 Comparación C de PM_{2.5} frente a Pcp 2017
Fuente: Elaboración propia



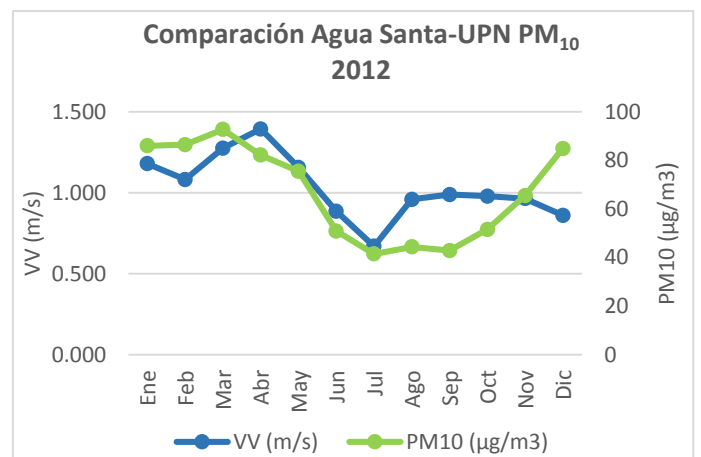
Gráfica 318 Comparación C de PM_{2.5} frente a VV 2017
Fuente: Elaboración propia



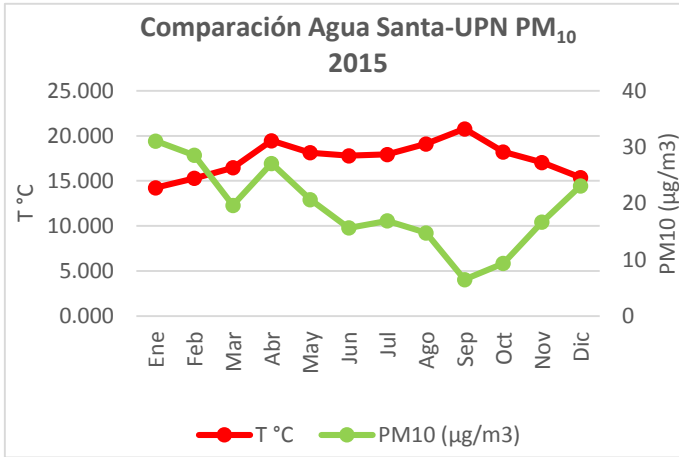
Gráfica 319 Comparación C de PM₁₀ frente a T °C 2012
Fuente: Elaboración propia



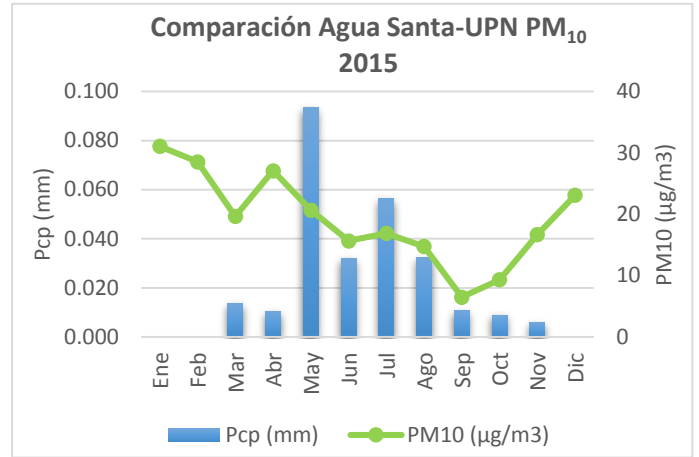
Gráfica 320 Comparación C de PM₁₀ frente a Pcp 2012
Fuente: Elaboración propia



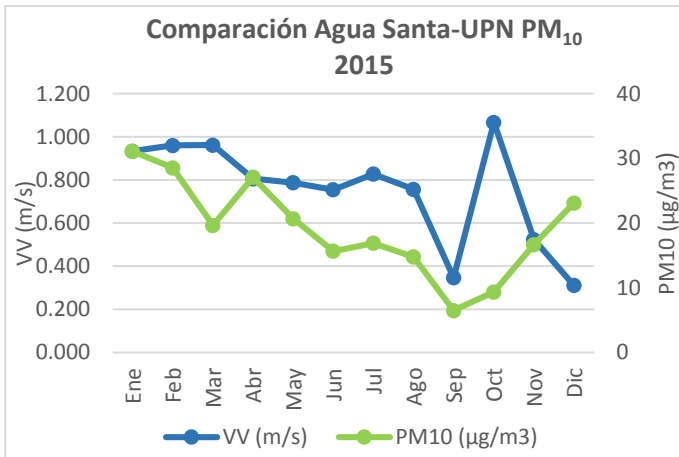
Gráfica 321 Comparación C de PM₁₀ frente a VV 2015
Fuente: Elaboración propia



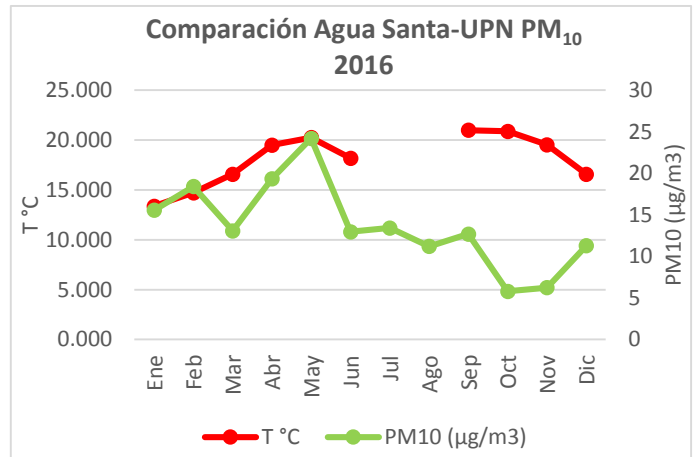
Gráfica 322 Comparación C de PM₁₀ frente a T °C 2015
Fuente: Elaboración propia



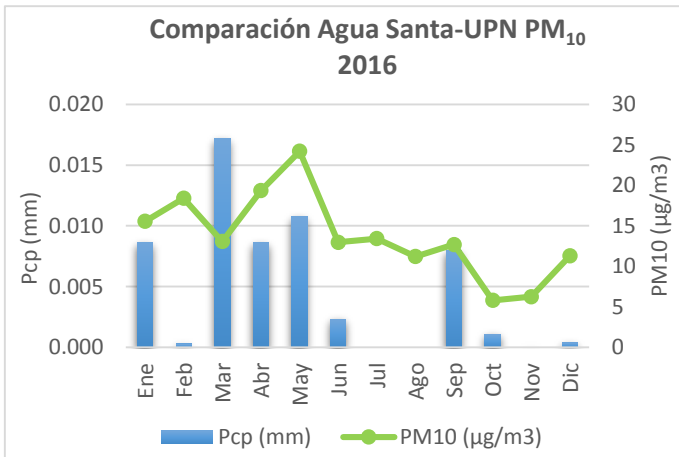
Gráfica 323 Comparación C de PM₁₀ frente a Pcp 2015
Fuente: Elaboración propia



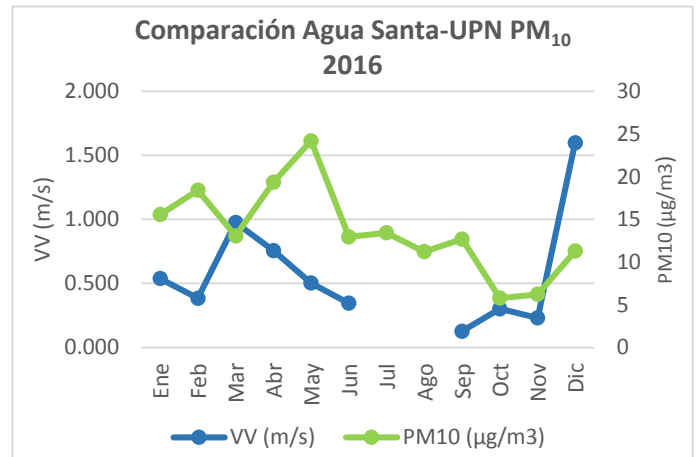
Gráfica 324 Comparación C de PM₁₀ frente a T °C 2015
Fuente: Elaboración propia



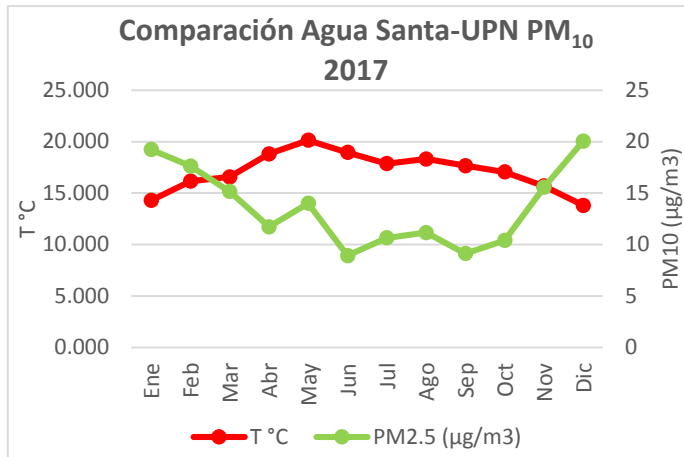
Gráfica 325 Comparación C de PM₁₀ frente a T °C 2016
Fuente: Elaboración propia



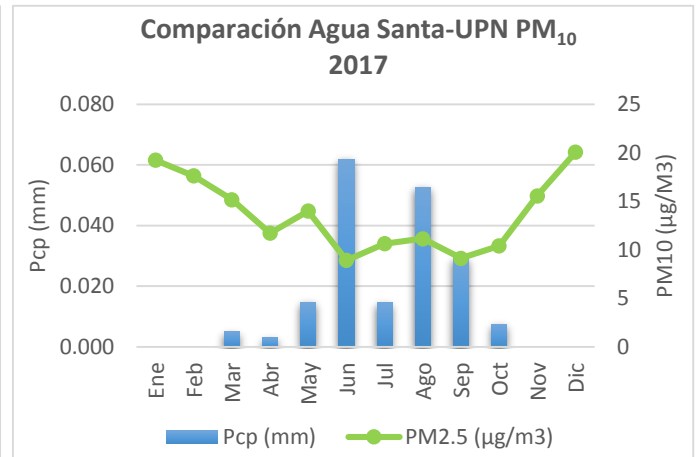
Gráfica 326 Comparación C de PM₁₀ frente a Pcp 2016
Fuente: Elaboración propia



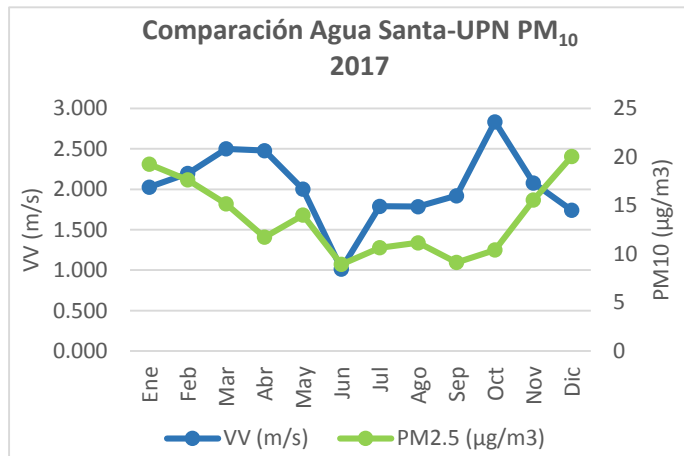
Gráfica 327 Comparación C de PM₁₀ frente a VV 2016
Fuente: Elaboración propia



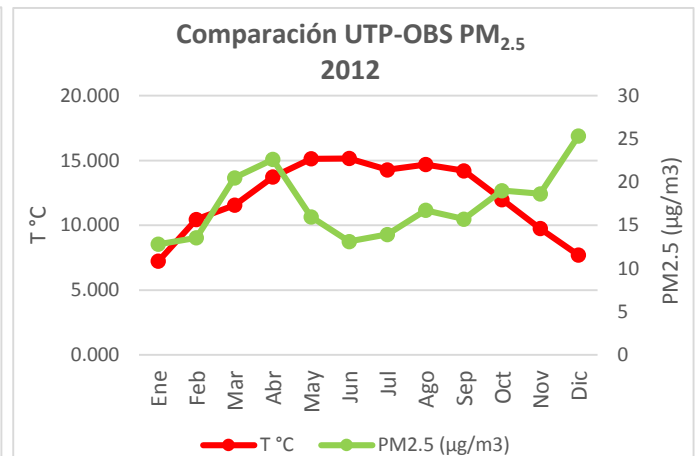
Gráfica 328 Comparación C de PM₁₀ frente a T °C 2017
Fuente: Elaboración propia



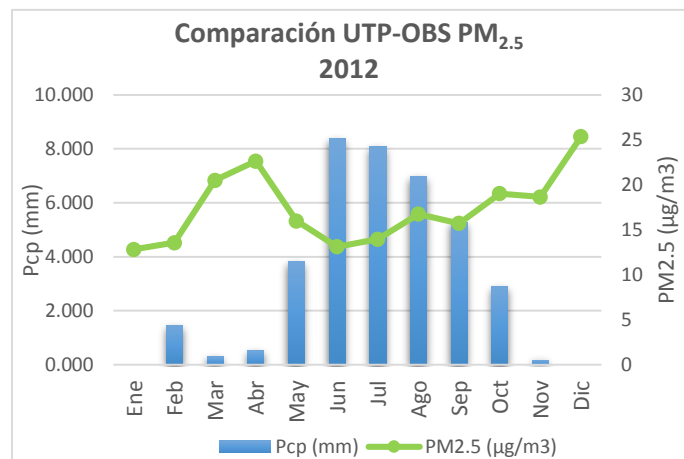
Gráfica 329 Comparación C de PM₁₀ frente a Pcp 2017
Fuente: Elaboración propia



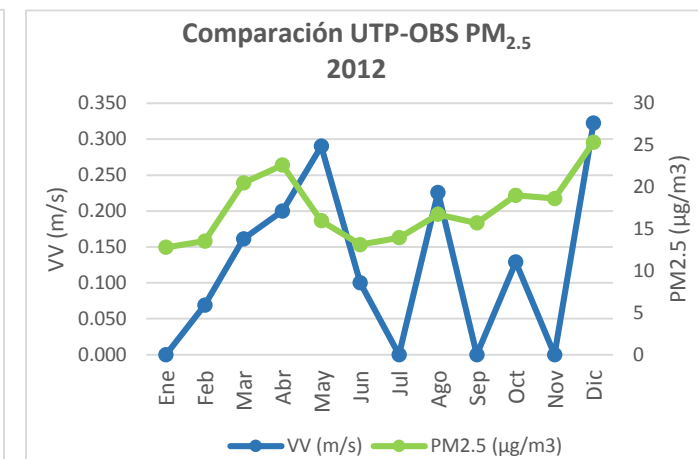
Gráfica 330 Comparación C de PM₁₀ frente a T °C 2017
Fuente: Elaboración propia



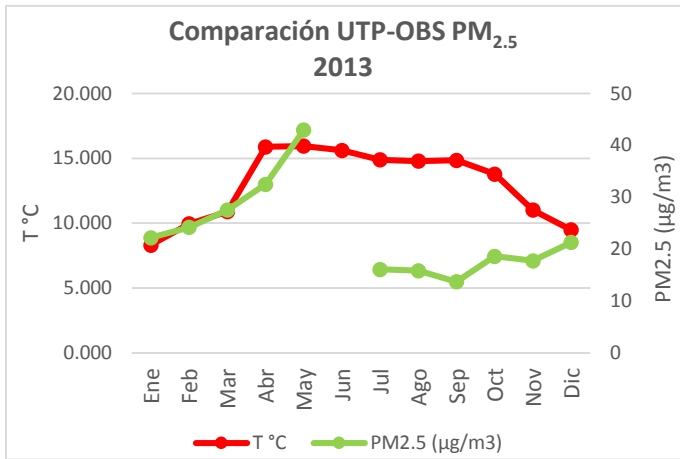
Gráfica 331 Comparación D de PM_{2.5} frente a T °C 2012
Fuente: Elaboración propia



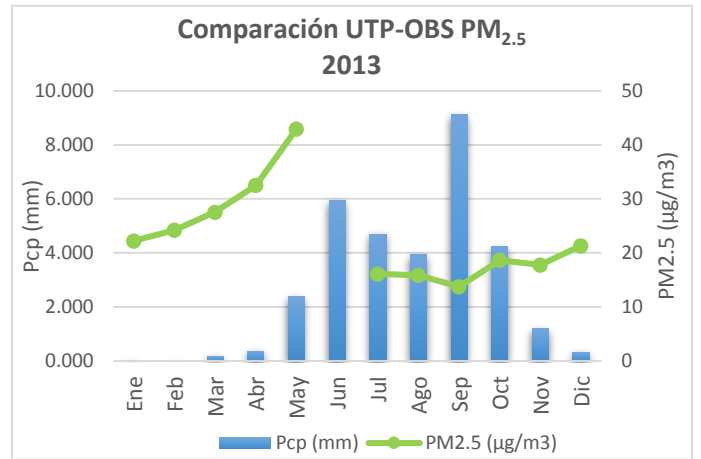
Gráfica 332 Comparación D de PM_{2.5} frente a Pcp 2012
Fuente: Elaboración propia



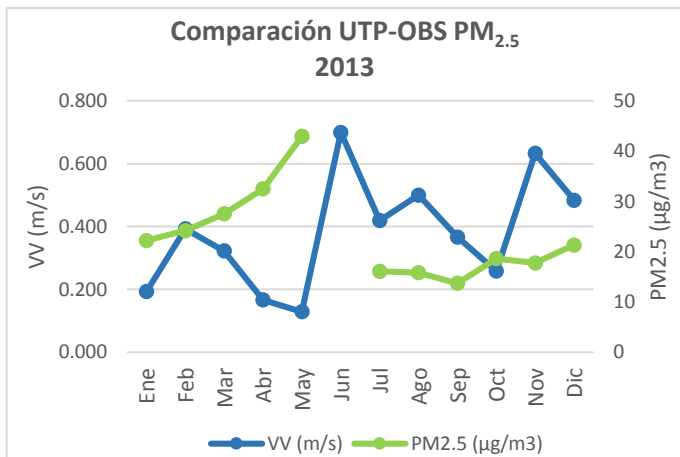
Gráfica 333 Comparación D de PM_{2.5} frente a VV 2012
Fuente: Elaboración propia



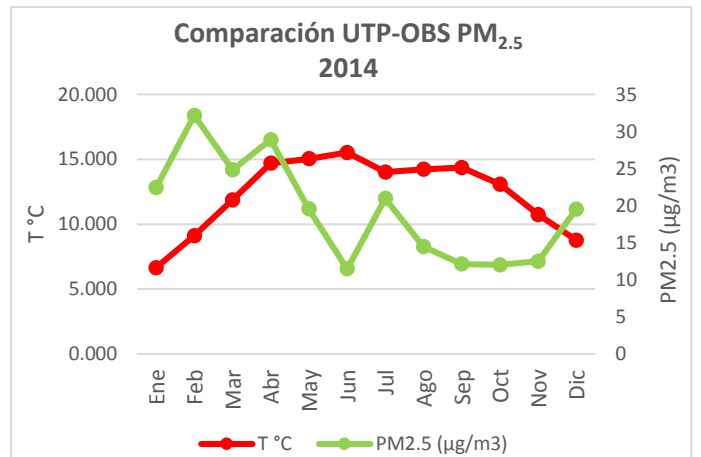
Gráfica 334 Comparación D de PM_{2.5} frente a T °C 2013
Fuente: Elaboración propia



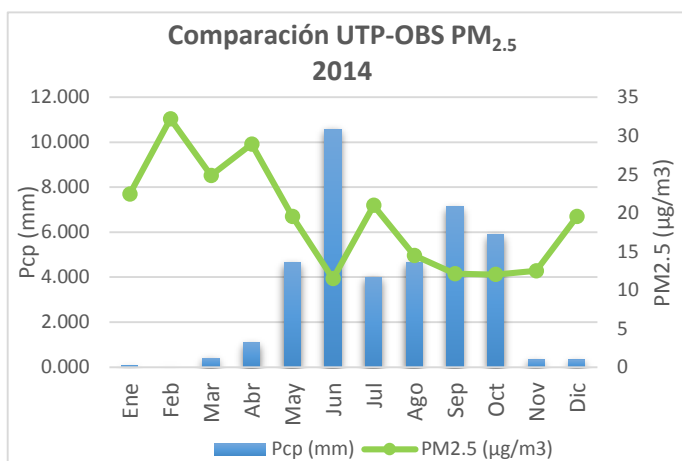
Gráfica 335 Comparación D de PM_{2.5} frente a Pcp 2013
Fuente: Elaboración propia



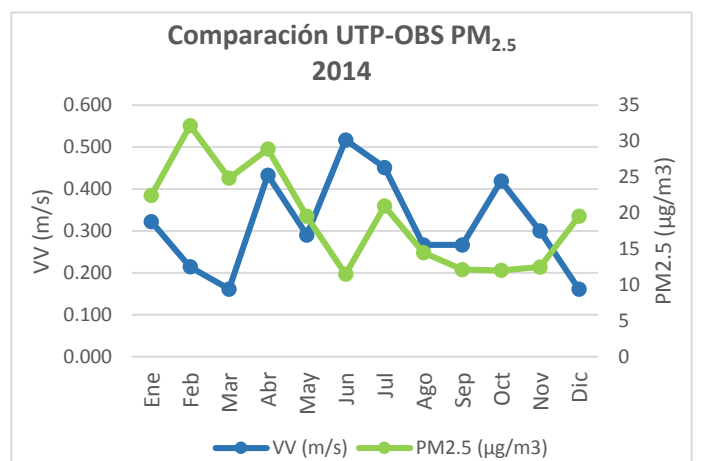
Gráfica 336 Comparación D de PM_{2.5} frente a VV 2013
Fuente: Elaboración propia



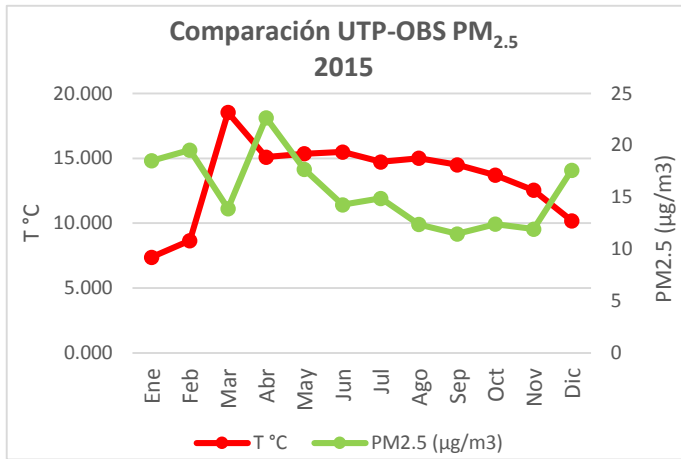
Gráfica 337 Comparación D de PM_{2.5} frente a T °C 2014
Fuente: Elaboración propia



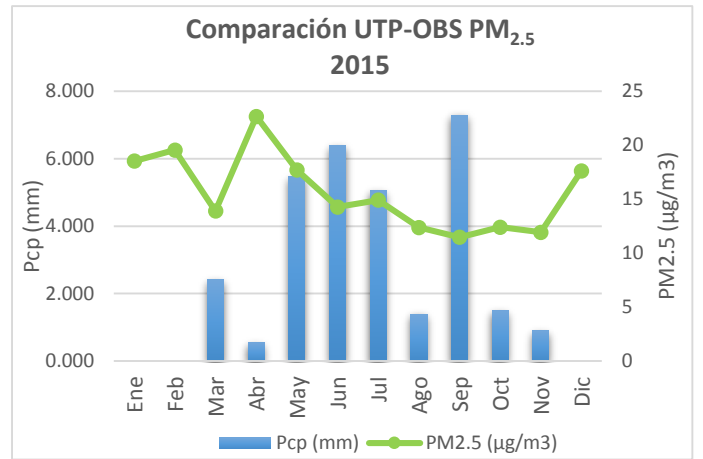
Gráfica 338 Comparación D de PM_{2.5} frente a Pcp 2014
Fuente: Elaboración propia



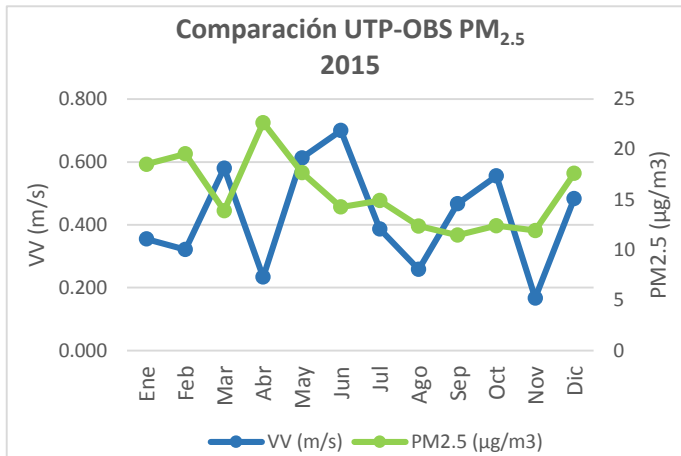
Gráfica 339 Comparación D de PM_{2.5} frente a VV 2014
Fuente: Elaboración propia



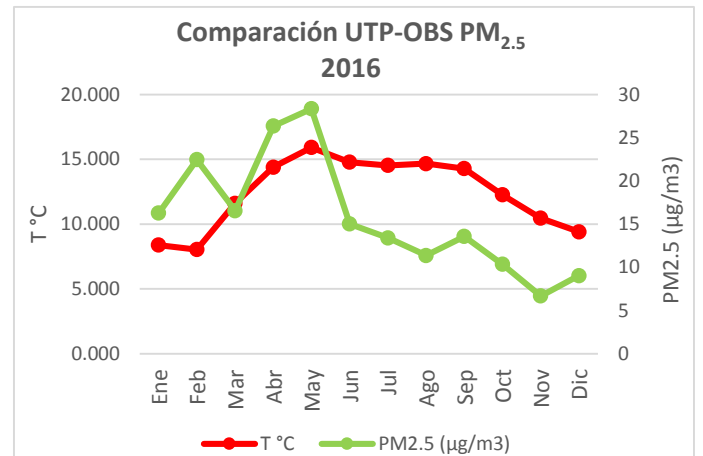
Gráfica 340 Comparación D de PM_{2.5} frente a T °C 2015
Fuente: Elaboración propia



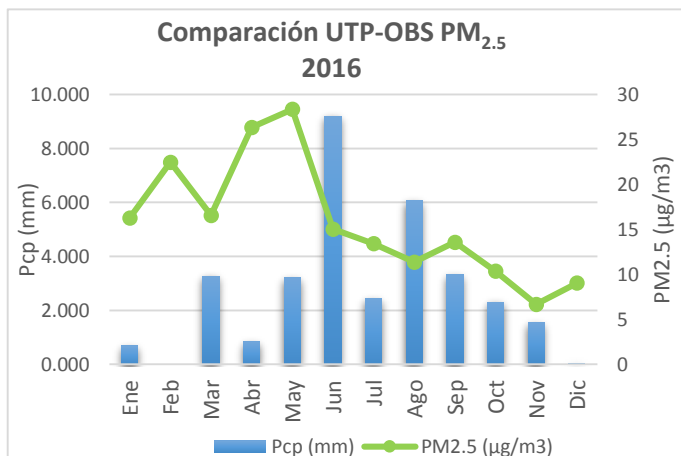
Gráfica 341 Comparación D de PM_{2.5} frente a Pcp 2015
Fuente: Elaboración propia



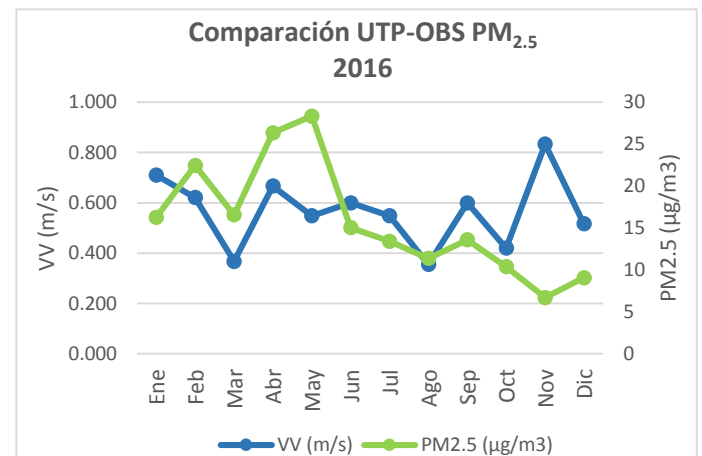
Gráfica 342 Comparación D de PM_{2.5} frente a VV 2015
Fuente: Elaboración propia



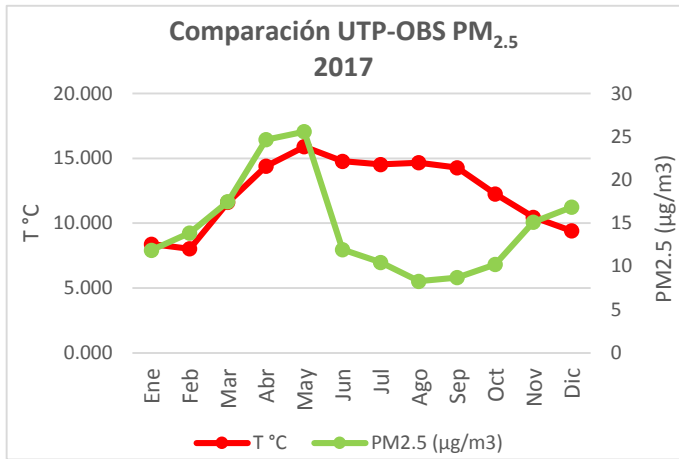
Gráfica 343 Comparación D de PM_{2.5} frente a T °C 2016
Fuente: Elaboración propia



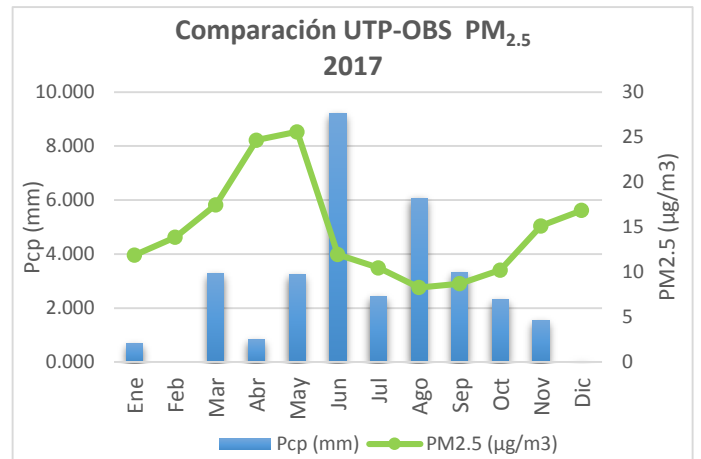
Gráfica 344 Comparación D de PM_{2.5} frente a Pcp 2016
Fuente: Elaboración propia



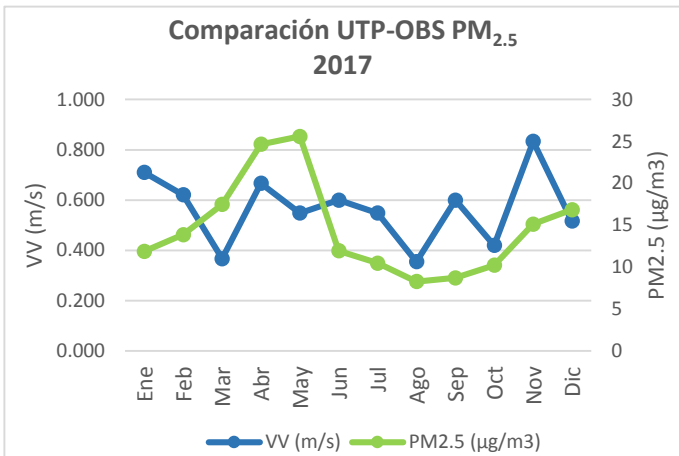
Gráfica 345 Comparación D de PM_{2.5} frente a VV 2016
Fuente: Elaboración propia



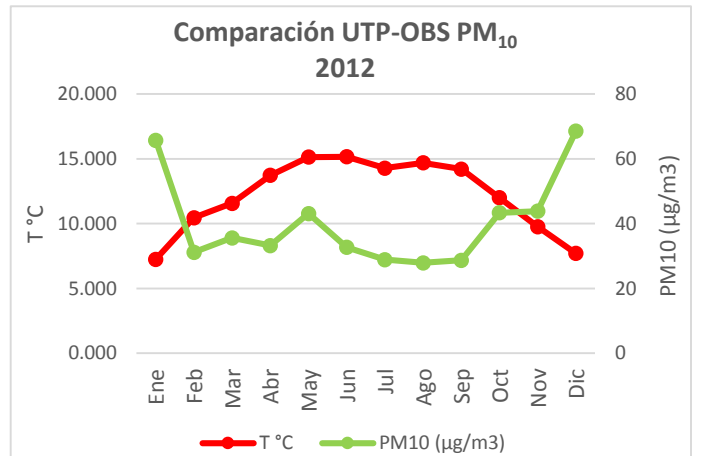
Gráfica 346 Comparación D de PM_{2.5} frente a T °C 2017
Fuente: Elaboración propia



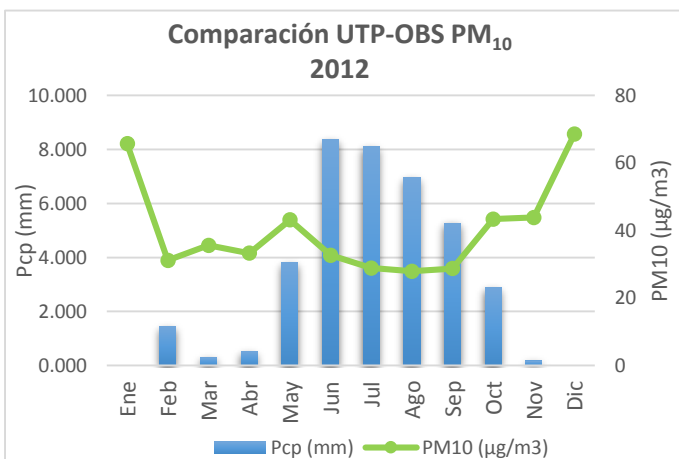
Gráfica 347 Comparación D de PM_{2.5} frente a Pcp 2017
Fuente: Elaboración propia



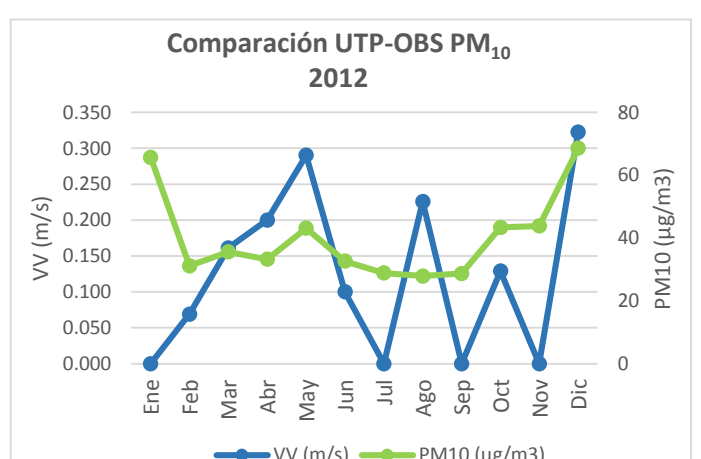
Gráfica 348 Comparación D de PM_{2.5} frente a VV 2017
Fuente: Elaboración propia



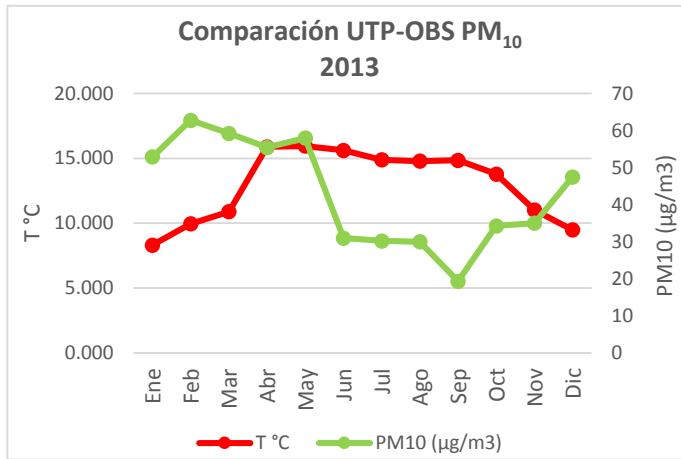
Gráfica 349 Comparación D de PM₁₀ frente a T °C 2012
Fuente: Elaboración propia



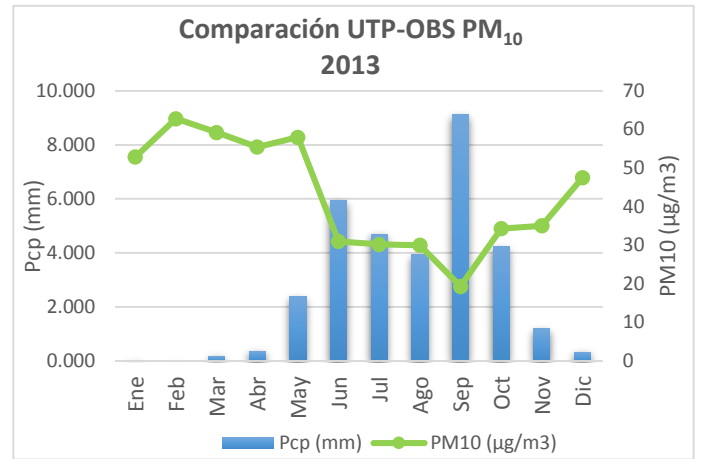
Gráfica 350 Comparación D de PM₁₀ frente a Pcp 2012
Fuente: Elaboración propia



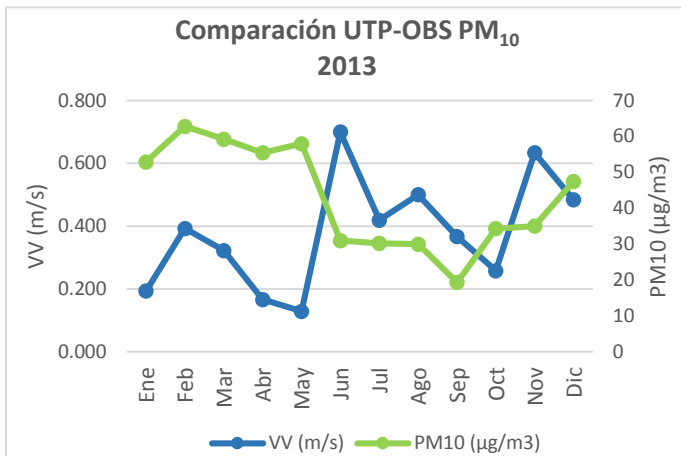
Gráfica 351 Comparación D de PM₁₀ frente a VV 2012
Fuente: Elaboración propia



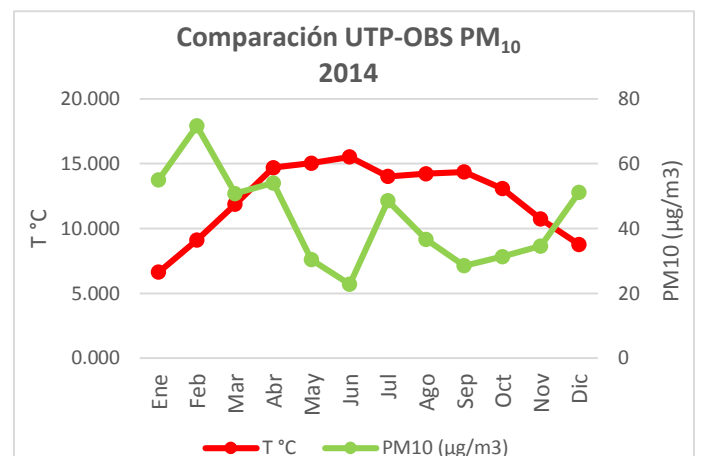
Gráfica 352 Comparación D de PM₁₀ frente a T °C 2013
Fuente: Elaboración propia



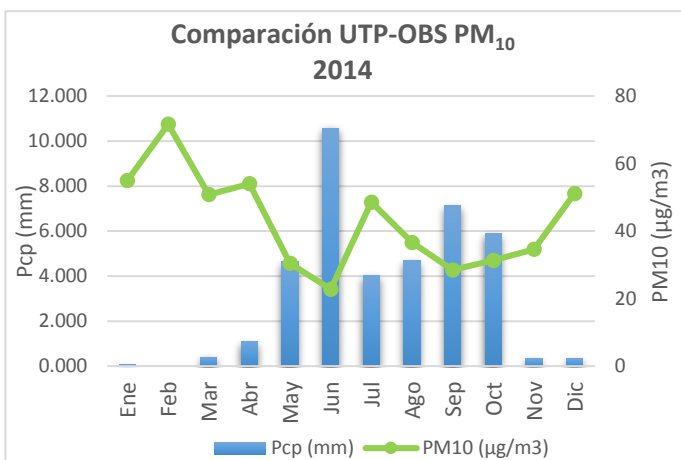
Gráfica 353 Comparación D de PM₁₀ frente a Pcp 2013
Fuente: Elaboración propia



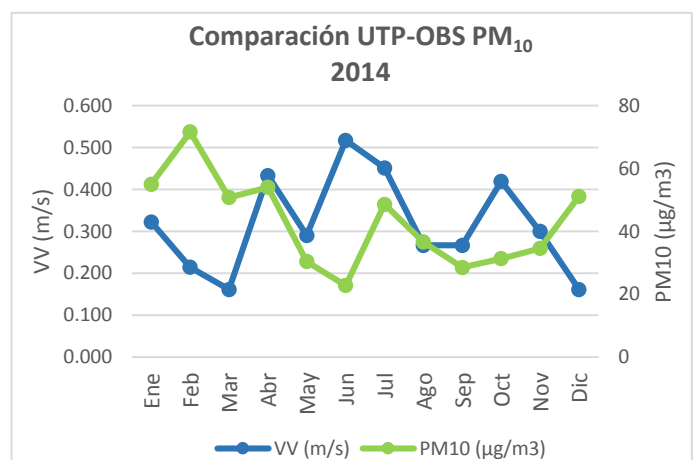
Gráfica 354 Comparación D de PM₁₀ frente a VV 2013
Fuente: Elaboración propia



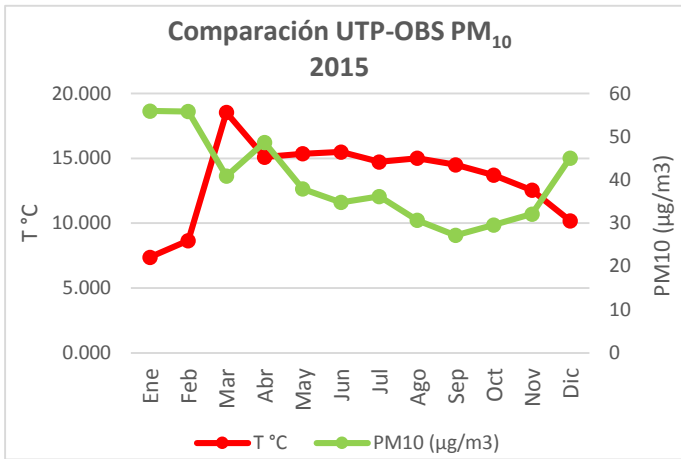
Gráfica 355 Comparación D de PM₁₀ frente a T °C 2014
Fuente: Elaboración propia



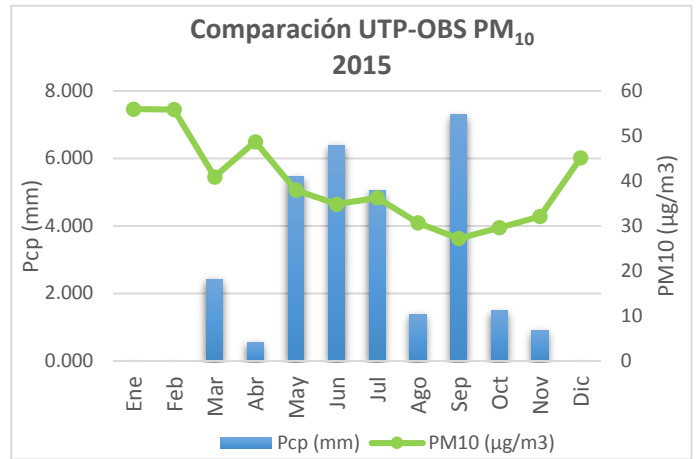
Gráfica 356 Comparación D de PM₁₀ frente a Pcp 2014
Fuente: Elaboración propia



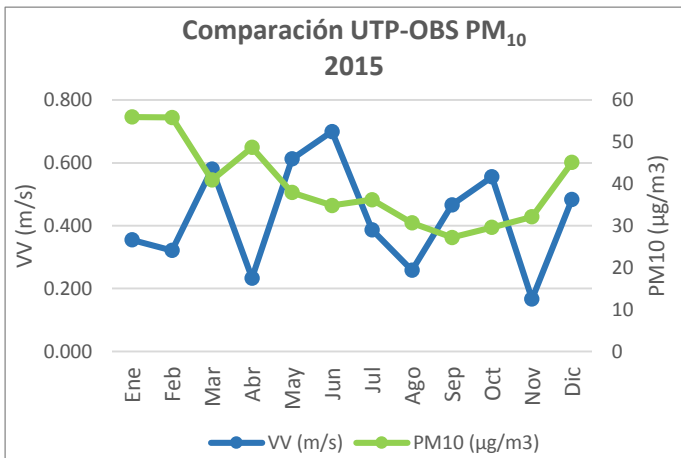
Gráfica 357 Comparación D de PM₁₀ frente a VV 2014
Fuente: Elaboración propia



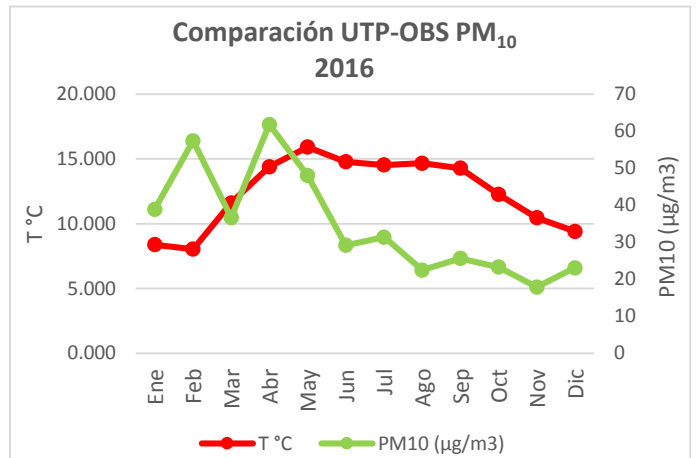
Gráfica 358 Comparación D de PM₁₀ frente a T °C 2015
Fuente: Elaboración propia



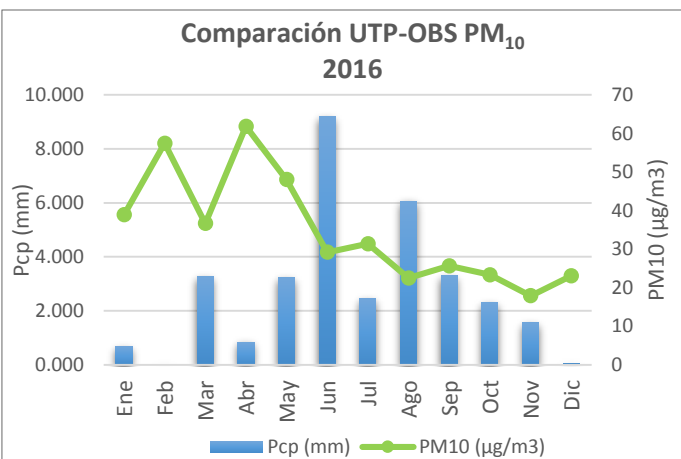
Gráfica 359 Comparación D de PM₁₀ frente a Pcp 2015
Fuente: Elaboración propia



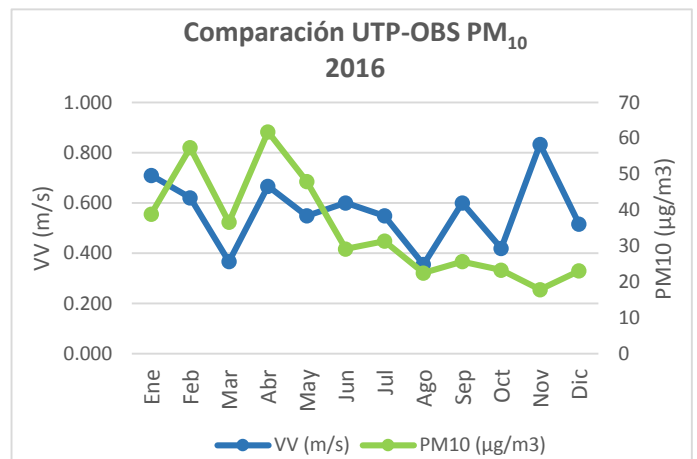
Gráfica 360 Comparación D de PM₁₀ frente a VV 2015
Fuente: Elaboración propia



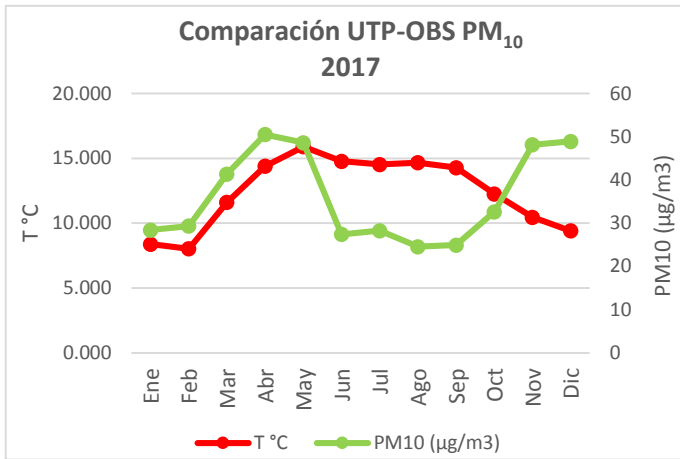
Gráfica 361 Comparación D de PM₁₀ frente a T °C 2016
Fuente: Elaboración propia



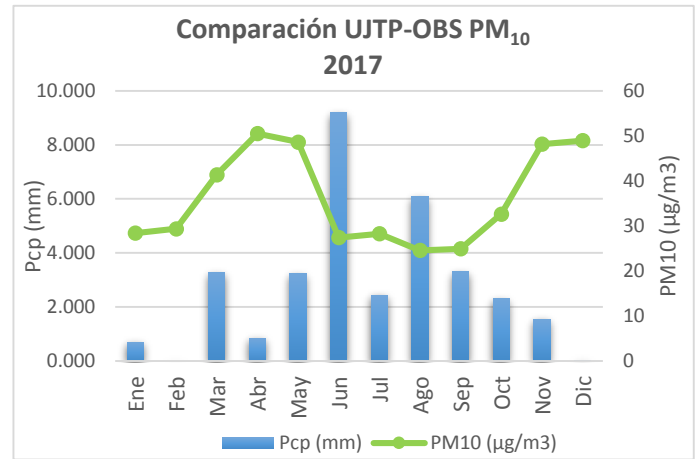
Gráfica 362 CompFigura 41 Determinación del promedio móvil de ocho horas y el máximo anual
Fuente: Elaboración Propia con datos provenientes de la REMA
Fuente: Elaboración propia



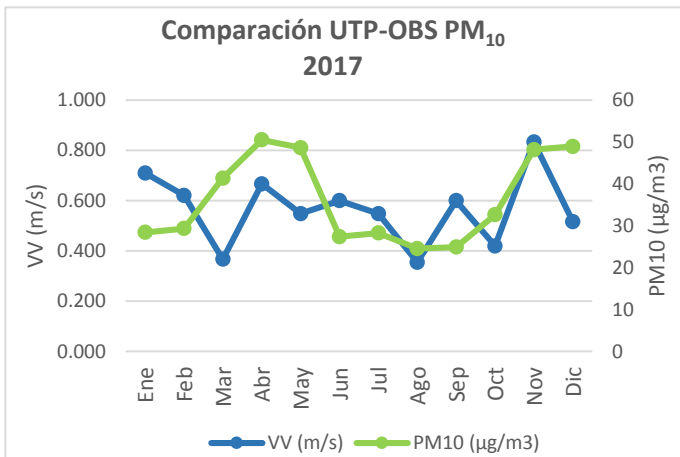
Gráfica 363 Comparación D de PM₁₀ frente a VV 2016
Fuente: Elaboración propia



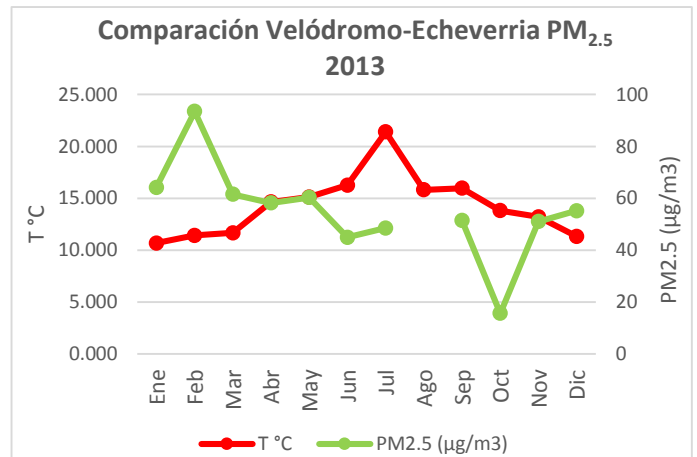
Gráfica 364 Comparación D de PM₁₀ frente a T °C 2017
Fuente: Elaboración propia



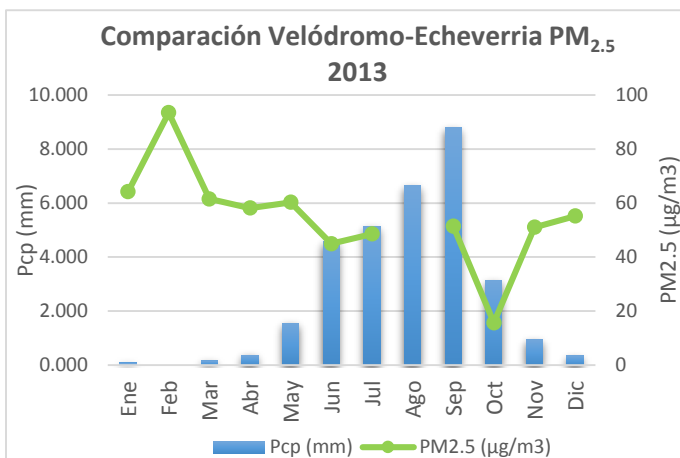
Gráfica 365 Comparación D de PM₁₀ frente a Pcp 2017
Fuente: Elaboración propia



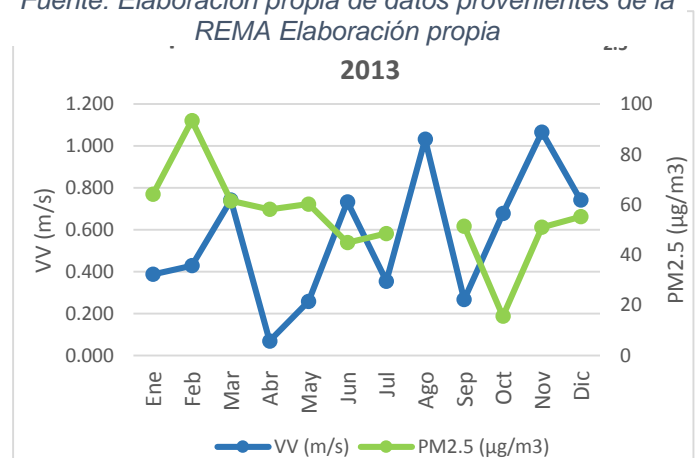
Gráfica 366 Comparación D de PM₁₀ frente a VV 2017
Fuente: Elaboración propia



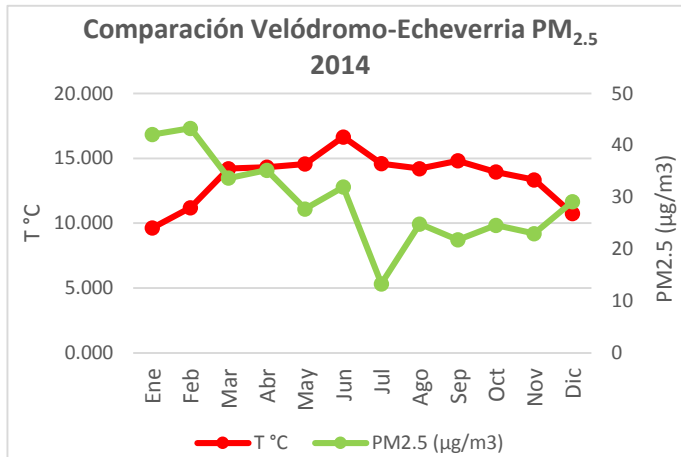
Gráfica 367 Comparación E de PM_{2.5} frente a T °C 2013
Fuente: Figura 42 Obtención de celdas vacías
Fuente: Elaboración propia de datos provenientes de la REMA Elaboración propia



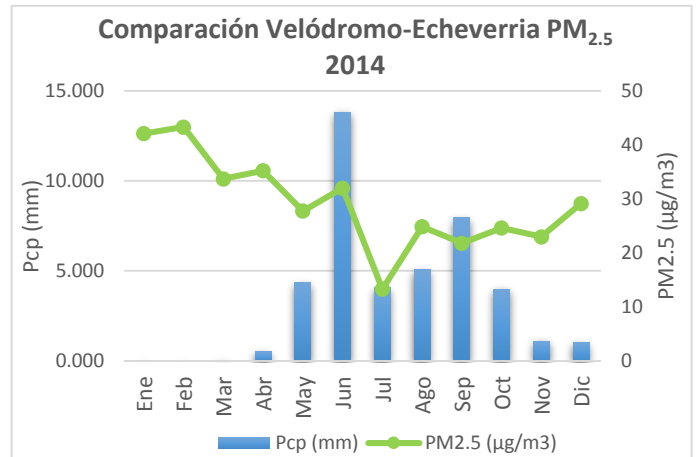
Gráfica 368 Comparación E de PM_{2.5} frente a Pcp 2013
Fuente: Elaboración propia



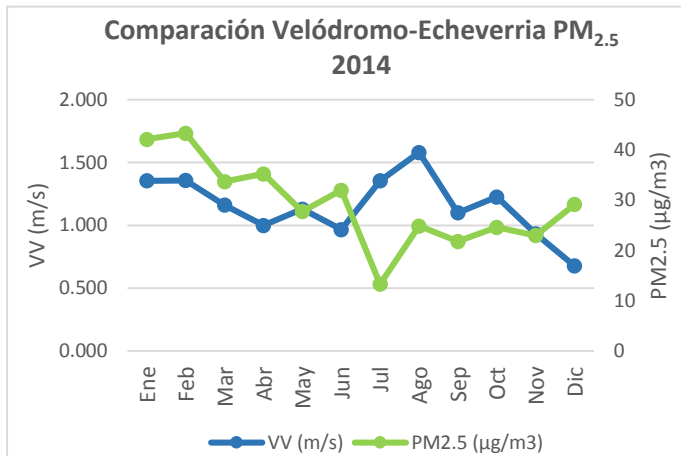
Gráfica 369 Comparación E de PM_{2.5} frente a VV 2013
Fuente: Elaboración propia



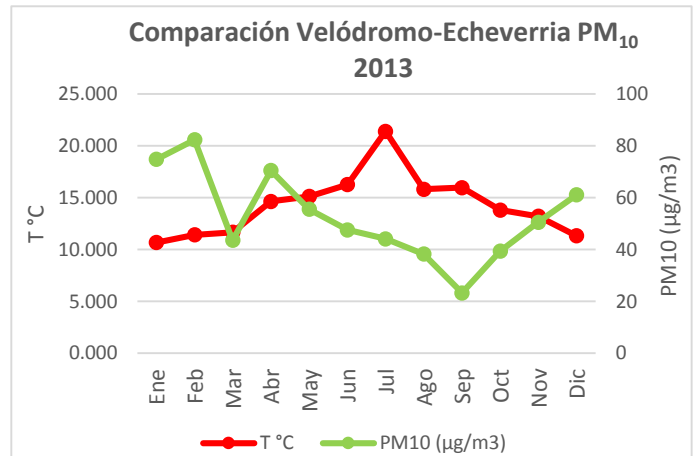
Gráfica 370 Comparación E de PM_{2.5} frente a T °C 2014
Fuente: Elaboración propia



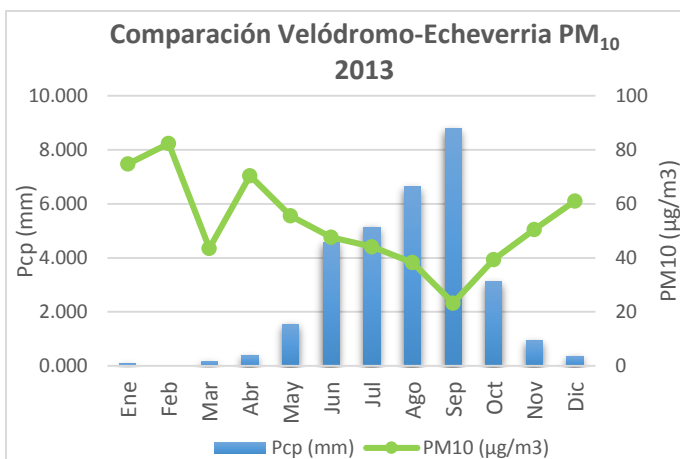
Gráfica 371 Comparación E de PM_{2.5} frente a Pcp 2014
Fuente: Elaboración propia



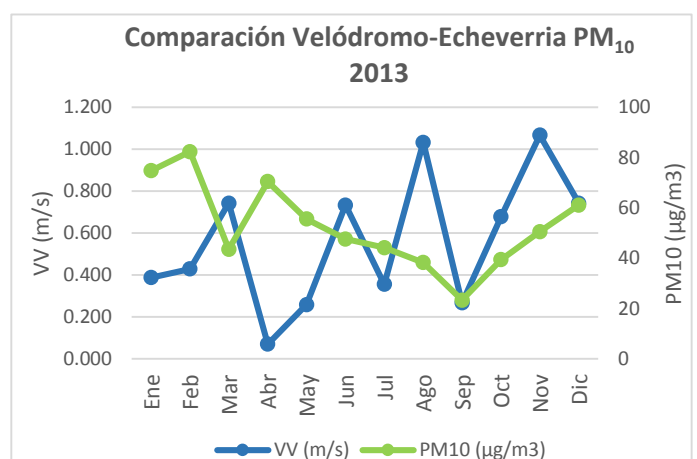
Gráfica 372 Comparación E de PM_{2.5} frente a VV 2014
Fuente: Elaboración propia



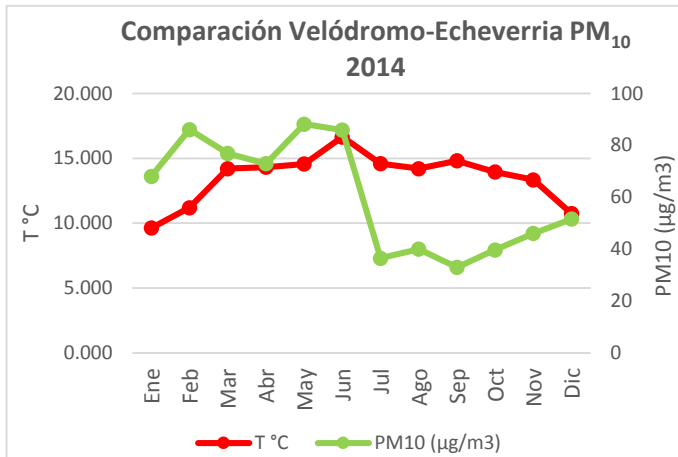
Gráfica 373 Comparación E de PM₁₀ frente a T °C 2013
Fuente: Elaboración propia



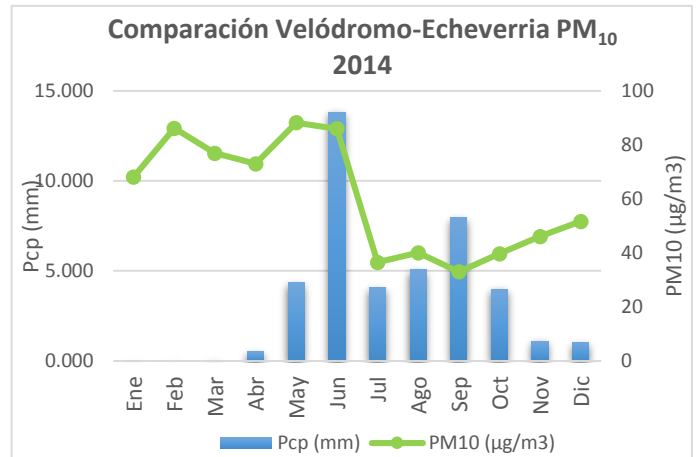
Gráfica 374 Comparación E de PM₁₀ frente a Pcp 2013
Fuente: Elaboración propia



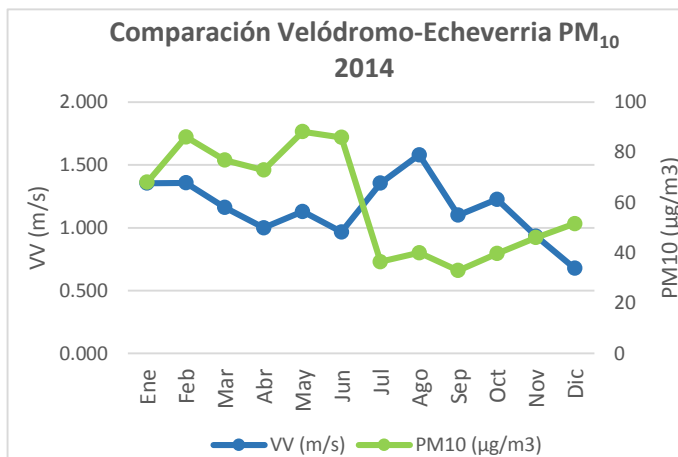
Gráfica 375 Comparación E de PM₁₀ frente a VV 2013
Fuente: Elaboración propia



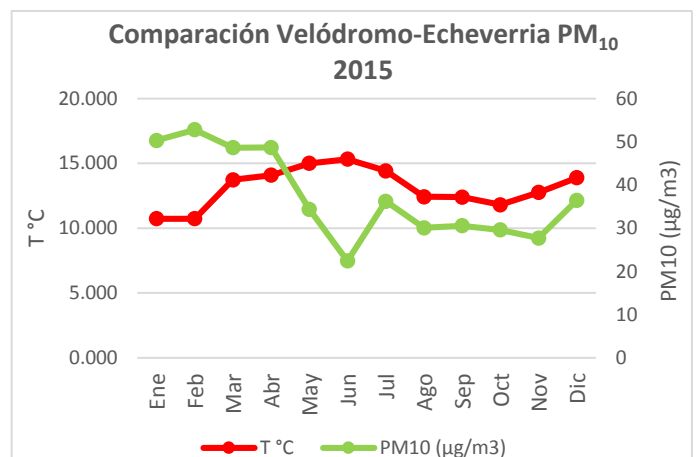
Gráfica 376 Comparación E de PM₁₀ frente a T °C 2014
Fuente: Elaboración propia



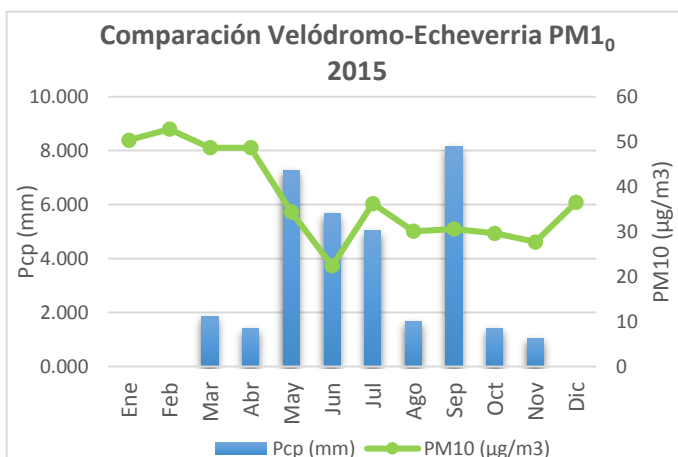
Gráfica 377 Comparación E de PM₁₀ frente a Pcp 2014
Fuente: Elaboración propia



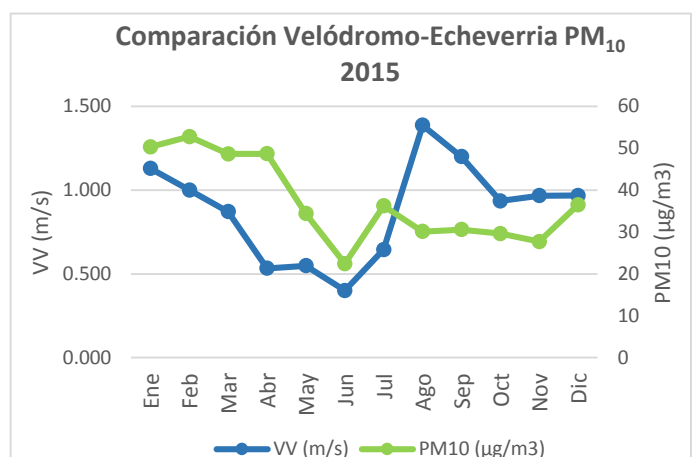
Gráfica 378 Comparación E de PM₁₀ frente a VV 2014
Fuente: Elaboración propia



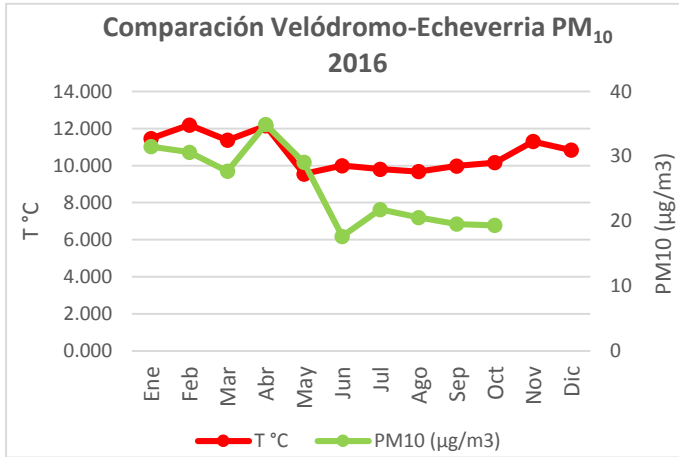
Gráfica 379 Comparación E de PM₁₀ frente a T °C 2015
Fuente: Elaboración propia



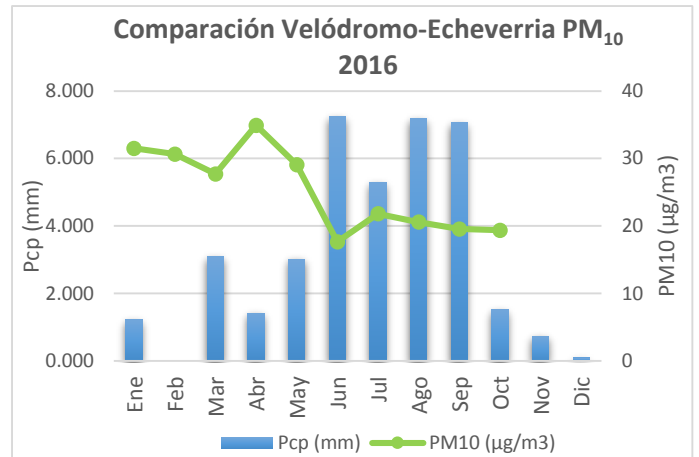
Gráfica 380 Comparación E de PM₁₀ frente a Pcp 2015
Fuente: Elaboración propia



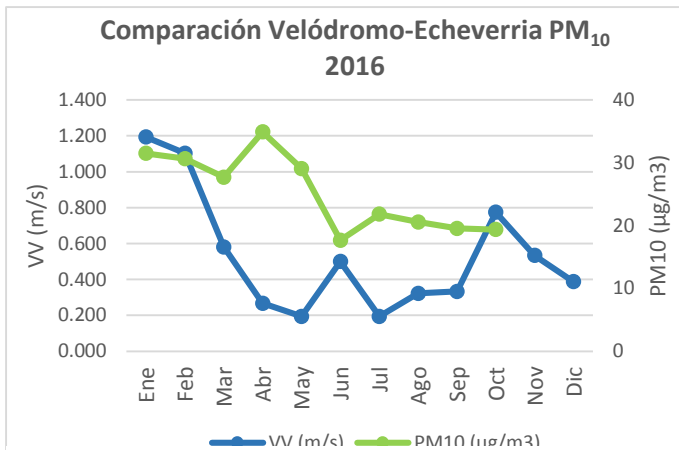
Gráfica 381 Comparación E de PM₁₀ frente a VV 2015
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 382 Comparación E de PM₁₀ frente a T °C 2016
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 383 Comparación E de PM₁₀ frente a Pcp 2016
Fuente: Elaboración propia



Gráfica 384 Comparación E de PM₁₀ frente a VV 2016
Fuente: Elaboración propia