



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

ESTUDIO DE LA DISPERSIÓN Y DESTINO
DE LOS CONTAMINANTES EN MONTERREY
MEDIANTE MODELACIÓN DE LA CALIDAD
DEL AIRE

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA:

DINORATH CHAMU SALGADO



MÉXICO, CDMX.

2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE:

Profesor: Víctor Manuel Luna Pabello

VOCAL:

Profesor: José Agustín García Reynoso

SECRETARIO:

Profesor: Alejandra Mendoza Campos

1er. SUPLENTE:

Profesor: Yamileth Yazmin Martinez Vega

2° SUPLENTE:

Profesor: María Elena Mondragon Tintor

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:
CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA**

ASESOR DEL TEMA:

José Agustín García Reynoso

SUSTENTANTE:

Dinorath Chamú Salgado

DEDICATORIAS

A mi padre Manuel Chamu Hernandez

Por ser mi inspiración, por haberme guiado con sabiduría mediante su ejemplo a luchar por mis sueños, aspirando a lo más alto y a no renunciar, con justicia, rectitud y bondad. Con amor y respeto.

A mi madre Estela Salgado Neri

Por ser cómplice de cada proyecto, por enseñarme a ser lo suficientemente fuerte para seguir firme en mi sendero, por todo su sacrificio y empeño por verme realizar mis sueños, porque con ternura y paciencia ha sabido educarme. Con amor y admiración.

A mis hermanos Carmen, Abraham, Manuel y Roberto

Por llenar mis días de alegría, porque a pesar de las tempestades cada uno ha sabido salir adelante, por cuidarme y enseñarme a cuidarme, con amor a esas personas maravillosas.

A mis tíos

Por su apoyo constante y sus valiosos consejos durante toda mi trayectoria escolar, en especial a Rommy Salgado y Temoc Iturralde por ser las personas más nobles que eh llegado a conocer. Con gratitud y respeto.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme la oportunidad de recibir todos los conocimientos necesarios para formarme no sólo a nivel académico sino que también a nivel personal.

A la Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación de la UNAM por los recursos y servicios de la Supercomputadora MIXTLI para la elaboración de esta Tesis.

A la Facultad de Química y a todos los profesores que la integran por enseñarme que los diamantes se forman bajo presión.

Al Centro de Ciencias de la Atmósfera por permitirme ampliar mis conocimientos dentro de sus instalaciones.

Al Dr. José Agustín García Reynoso por ser una excelente persona y profesor, por su paciencia, consejos y dedicación, mis más profundo respeto y admiración.

Al Mtro. José Miguel Noyola Pobleto por su apoyo incondicional durante toda la realización de esta tesis, por sus valiosos conocimientos, experiencia y consejos, mis más sinceros agradecimientos.

Resumen

El Área Metropolitana de Monterrey (AMM) es la médula de la industria mexicana, constituye el centro de la actividad industrial, servicios, agroindustria y el incremento de las unidades automotoras del Estado de Nuevo León, traen como resultado un consumo intenso de combustibles que pueden dañar la salud humana, los ecosistemas y los recursos materiales.

El presente trabajo de tesis presenta la modelación de calidad del aire en Monterrey mediante el modelo WRF-CHEM, los resultados de concentraciones del modelo se comparan con datos observados obtenidos del SINAICA (Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire).

Se analizaron las métricas estadísticas de la comparación, la influencia de la meteorología en el aumento o disminución de la contaminación y para determinar la edad de las parcelas de aire se empleó la relación O_3/CO de 8 estaciones de Monterrey así como para identificar el origen, el destino, las trayectorias y la contribución de cada una de las fuentes de emisión de monóxido de carbono (CO) y ozono (O_3), al realizar la evaluación se identificó el periodo de interés mediante el análisis de los datos de monitoreo.

Se encontró en que varias estaciones el 16 de Febrero a las 16:00 pm, la temperatura ambiental llega a rebasar los $30^{\circ}C$ y en esos periodos se observó altas concentraciones ambientales de ozono (O_3).

Índice

1. Introducción	8
1.1 Objetivo general	9
1.2 Objetivos Particulares	9
2. Antecedentes	9
2.1 Contaminación atmosférica en Monterrey	9
2.2 Contaminación atmosférica	12
2.2.1 Monóxido de carbono	13
2.2.2 Ozono (O ₃)	14
2.3 Tipos de emisiones de contaminantes atmosféricos	15
2.4 Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de la calidad del Aire Ambiente	15
2.5 Efectos de la contaminación ambiental	17
3. Métodos y datos	19
3.1 Colección de datos	19
3.2 Identificación del periodo a estudiar	19
3.3 Modelo WRF.....	23
3.3.1 Modelo WRF-CHEM.....	24
3.4 Formulación del modelo	25
3.4.1 Componentes del modelo WRF.....	25
3.4.2 Etapa de procesamiento	29
3.4.3 Salidas de WRF	29
3.5 Evaluación del modelo	30
3.5.1 Descripción de las métricas estadísticas	31
3.6 Trayectorias.....	36
3.7 Cociente O ₃ /CO	37
4. Resultados y Análisis.....	38
4.1 Análisis del modelo	38
4.2 Evaluación de las métricas estadísticas.....	41
4.3 Análisis del modelo e influencia de la meteorología	46
4.4 Trayectorias.....	68
4.4.1 Origen de los contaminantes de Monterrey	68
4.4.2 Resultados del cociente O ₃ /CO	77
4.4.3 Destino de los contaminantes de Monterrey	81

5. Discusión de resultados	83
6. Conclusiones.....	85
7. Bibliografía.....	87

1. Introducción

El crecimiento económico y la urbanización, asociados al desarrollo de diversas actividades como la industria petrolera, los servicios, la agroindustria y el incremento de las unidades automotoras, traen como resultado un consumo intenso de combustibles fósiles; al mismo tiempo, la práctica de actividades agropecuarias no apropiadas inciden en la generación de elevados volúmenes de contaminantes, que al relacionarse con las condiciones ambientales pueden dañar la salud humana, los ecosistemas y los recursos materiales [1].

Tal es el caso de Monterrey, la ciudad más poblada de estado de Nuevo León, rodeada de montañas, con el cerro de la Silla al fondo de la ciudad (anexo I), se encuentra al noreste de México, es la tercera ciudad más importante del país después de la CDMX y el Estado de México, ya que concentra gran parte de la industria mexicana, destacando la industria siderúrgica.

Debido al crecimiento urbano y las actividades propias de una ciudad industrial como Monterrey, es de vital importancia estar evaluando y monitoreando la calidad del aire para preservar la salud de los habitantes de esta gran urbe.

El Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA) nos proporciona información acerca de concentraciones de contaminantes por hora, día, semana y mes, así como, información de variables meteorológicas como temperatura, presión, radiación solar, humedad relativa, dirección y velocidad del viento. La información es recabada en una base de datos, mediante 13 estaciones de monitoreo distribuidas en los 13 municipios de la Zona Metropolitana de Monterrey como: Apodaca, Cadereyta, Jiménez, El Carmen, García, San Pedro Garza García, Escobedo, Guadalupe, Juárez, Monterrey, Salinas Victoria, San Nicolás de los Garza, Santa Catarina y Santiago.

En la actualidad las empresas no sólo buscan la proximidad de recursos, insumos y mercados, sino también cuestiones cualitativas como el clima, el ambiente y condiciones para la expansión y calificación de la fuerza de trabajo.

Existen métodos para controlar la contaminación que han demostrado una gran eficacia, especialmente los de ámbito local. Para su aplicación es preciso analizar de forma sistemática la fuente y la naturaleza de la emisión o el vertido en cuestión, su interacción con el ecosistema y el problema de contaminación ambiental que debe solucionarse, para a continuación elegir las tecnologías más adecuadas que permitan reducir y vigilar estos impactos por contaminación.

Existen modelos para la investigación y pronóstico del tiempo de la calidad del aire a escala regional como el WRF-CHEM a través del cual se puede simular la emisión, el transporte, la mezcla, la transformación química de gases y aerosoles involucrando la química y la meteorología simultáneamente.

El trabajo de tesis pretende modelar la calidad del aire en Monterrey mediante el modelo WRF-CHEM y comparar los resultados con datos observados obtenidos del SINAICA. Además, analizar las métricas estadísticas, la influencia de la meteorología en el aumento o disminución de la contaminación y determinar el origen de las parcelas de aire mediante el cociente O_3/CO , así como, identificar el origen, el destino, las trayectorias y la contribución de cada una de las fuentes de emisión de monóxido de carbono (CO) y ozono (O_3).

1.1 Objetivo general

- Estudiar el origen y destino de la contaminación en la calidad del aire en Monterrey.

1.2 Objetivos Particulares

- Identificar el período de modelación.
- Simulación de la calidad del aire de Monterrey mediante WRF-CHEM
- Analizar y comparar las métricas estadísticas del modelo WRF-CHEM con datos obtenidos del SINAICA.
- Identificar la influencia de la meteorología en el aumento o disminución de la concentración de contaminantes.
- Identificar las trayectorias de los contaminantes.
- Corroborar el origen de los contaminantes a través del cociente O_3/CO .

2. Antecedentes

2.1 Contaminación atmosférica en Monterrey

Hay una relación indudable entre la salud y el lugar en el que se habita, conocidas ya de largo tiempo atrás. El proceso de industrialización y desarrollo producido en los pasados siglos ha propiciado un importante crecimiento de los núcleos urbanos y de la población que en ellos habita [2].

El Área Metropolitana de Monterrey (AMM) es actualmente la ciudad más grande del país y la médula de la industria mexicana, constituye el centro de la actividad industrial, motor económico, centro de los negocios e inversión del Estado de Nuevo León. Se ubica al noroeste de México, con una extensión territorial de 451.30 km^2 , con un total de 1 109 171 habitantes [3]. Está limitado al norte con los municipios de San Nicolás de los Garza y General Escobedo; al sur con los

municipios de San Pedro Garza García y Santiago; al este con Guadalupe y Juárez; y al oeste con Santa Catarina y García.

Monterrey es también conocida como: la “Ciudad de las Montañas” por la características formaciones que tiene dentro y alrededor de la ciudad, tales como; El Cerro de la Silla, El Cerro de las Mitras, La Sierra Madre Oriental y El Cerro del Topo Chico (ver anexo I, mapa del relieve de Monterrey) [4].

Esta ciudad fue una de las ciudades más favorecidas por la política de industrialización vía sustitución de importaciones establecida en México a raíz de la Segunda Guerra Mundial. El eje de su industrialización fue la siderurgia, el vidrio, el cemento, la cerveza y, recientemente, la química y la de bienes duraderos. Este tipo de industrias suelen denominarse "básicas" por ser exportadoras, imprimiéndole a la ciudad una mayor dinámica de crecimiento por surtir al mercado local y también al regional, nacional e internacional [5].

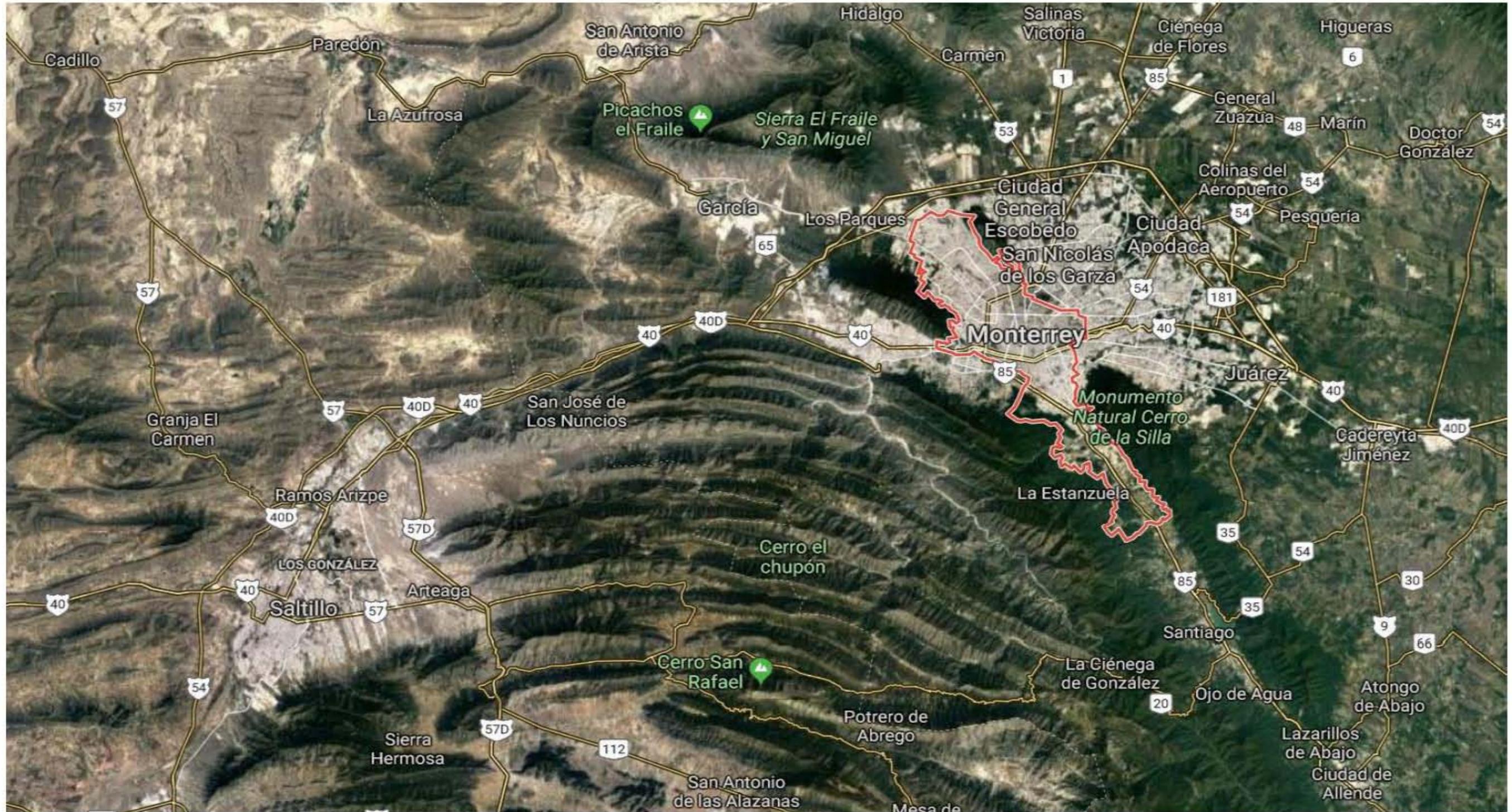
La expansión económica de Monterrey implica una mayor demanda de trabajadores y otros factores de la producción, induciendo un elevado crecimiento demográfico vía altas tasas de inmigración.

Las actividades económicas y la población requieren tierra urbana, infraestructura y servicios, lo que explica el nexo indisoluble entre expansión económica y desarrollo urbano, el uso de los recursos y medios de transporte de tales insumos impactan en la calidad del aire, causando problemas a la salud de los habitantes [6].

Saltillo se encuentra a 87.2 km de Monterrey, este municipio se ubica al sureste del estado de Coahuila, forma parte de la Región Norte de México. Cuenta con una población de 985,229 habitantes [7], lo que la convierte en la décimo séptima ciudad más poblada de México. Forma parte de la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental dividida en 3 subprovincias denominadas Sierras Transversales, Pliegues de Saltillo-Parras y Gran Sierra Plegada [8].

La tendencia hacia la regionalización en las formas de producción se ha caracterizado por la creciente evolución del sector manufacturero. En el estado de Coahuila, en particular el área urbana de Saltillo, el proceso de industrialización ha aumentado significativamente. Por encontrarse en un estado fronterizo del norte, la región de Saltillo puede competir con ventaja en la captación de inversión.

Imagen 1. Ubicación de Monterrey-Saltillo. Fuente: Google maps.



Fuente: Google maps.

Coahuila comparte 512 kilómetros de frontera con Estados Unidos, particularidad que ha permitido el rápido desarrollo de la industria maquiladora, en especial en la región fronteriza del estado, aunque también hay una presencia creciente de plantas de ensamblado de automóviles y autopartes en el sureste de la zona [9].

Las actividades industriales, comerciales y de servicios que se desarrollan entre Saltillo y Monterrey para su operación se requieren del consumo de combustibles fósiles. La infraestructura del transporte y movilidad está relacionada como una de las fuentes principales de aportación de contaminantes al aire, el incremento de vehículos automotores, el tráfico constante en zonas urbanas, el transporte público, de carga que impactan considerablemente en el deterioro de la calidad del aire por la generación y concentración de contaminantes. Asimismo, las características geográficas y físicas de cada región influyen en la calidad del aire que se respira, además de las condiciones climáticas que determinan la dispersión o caso contrario la acumulación de contaminantes y la exposición de la población a estos [10].

2.2 Contaminación atmosférica

La contaminación puede definirse como cualquier modificación indeseable del ambiente, causada por la introducción a este de agentes físicos, químicos o biológicos (contaminantes) en cantidades superiores a las naturales, que resulta nociva para la salud humana, dañar los recursos naturales, alterar el equilibrio ecológico o bienes [11].

Los contaminantes se dividen en tres grupos:

Biológicos: El aire actúa como medio de transmisión de agentes biológicos, en ocasiones estos agentes se multiplican debido a la actividad humana dando lugar a problemas epidemiológicos [12].

Físicos: La propagación de ondas acústicas puede causar molestias a la población ya que el oído humano es sensible a las ondas de presión [13].

Químicos: En la atmósfera se encuentran una serie de compuestos que contribuyen a la contaminación del aire, de los cuales se pueden diferenciar dos grupos principales:

- A. Contaminantes primarios: Son vertidos directamente a la atmósfera por alguna fuente de emisión como chimeneas, automóviles, entre otros. Los contaminantes atmosféricos que integran este grupo son: como óxidos de azufre (SO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), partículas ($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10}) e hidrocarburos.

- B. Contaminantes secundarios: Son los contaminantes originados en el aire como consecuencia de la transformación y reacciones químicas que sufren los contaminantes primarios en la atmósfera. Se pueden considerar: Ozono (O₃), lluvia ácida y la contaminación fotoquímica [11].

2.2.1 Monóxido de carbono

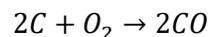
El monóxido de carbono existe en la atmósfera de todas las grandes ciudades, en las cuales su fuente principal es la combustión incompleta del carbón, del petróleo y de otros combustibles orgánicos, ya sea en viviendas, industrias o en gases de escape de los vehículos de motor, estos gases de escape pueden contener del 1 al 15% de CO [14].

La concentración de CO en la atmósfera en lugares no contaminados oscila entre 0.02 y 1.5 ppm con un tiempo medio de residencia de 36 a 110 días, mientras que en las ciudades con mucho tráfico y condiciones climatológicas particulares puede sobrepasar las 100 y hasta 320 ppm de acuerdo a la proximidad de los focos emisores [15].

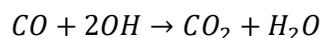
El monóxido de carbono (CO) es un subproducto de la combustión incompleta de materiales que contienen carbono en su composición (materias orgánicas), por ejemplo: la materia orgánica (carbón, madera, papel, aceites, gases, gasolinas, etc.), los fogones, estufas y calentadores de gas.

En las calles de las grandes ciudades suelen existir elevados niveles de CO, fundamentalmente debida a la combustión de los automóviles y fábricas en las que se utilice como combustible carbón, gas o petróleo. También se producen elevadas tasas de CO en los incendios, en explosiones y en espacios confinados. Se producen muchas intoxicaciones en el medio laboral en talleres de coches, minería y soldaduras [16].

El CO también se forma en la reacción a elevada temperatura entre el CO₂ y materiales que tienen carbono, además de en la disociación del CO₂ a altas temperaturas. El monóxido de carbono (CO) se produce por la combustión de materia orgánica en una atmósfera con insuficiencia de oxígeno (combustión incompleta), a través de la siguiente reacción:



El CO de forma natural se puede consumir a través de una reacción química en la naturaleza (con los radicales hidroxilos del ambiente):

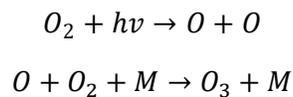


Otras fuentes son; el humo del tabaco, presenta una cantidad apreciable de CO, la combustión normal de 1g de tabaco produce de 0.1 a 0.3 cm³ de este gas, las

minas al utilizar explosivos provocan CO por la oxidación lenta del carbono, entre otras [17].

2.2.2 Ozono (O₃)

El ozono cumple una función protectora vital en la estratósfera porque absorbe la radiación ultravioleta dañina y sirve como escudo de radiación, protegiendo a los seres vivos en la Tierra de los efectos de la exposición de cantidades excesivas de dicha radiación. El ozono se produce a través de una reacción fotoquímica (donde la radiación debe ser menor de 242.2 nm, seguida por una reacción de tres cuerpos) [18]:



El ozono troposférico (también llamado “ozono ambiental” u “ozono a bajo nivel”) se produce cuando los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los compuestos orgánicos volátiles (COV’S) de fuentes como la quema de combustible reaccionan mediante procesos fotoquímicos a la luz del sol. Las centrales eléctricas, el escape de los vehículos automotores, los vapores de la gasolina y los solventes químicos son las fuentes principales de estas emisiones [19].

El ozono también se forma en niveles bajos proveniente de emisiones naturales de COV’S, NO_x y CO (precursores de ozono), así como del ozono estratosférico que en ocasiones desciende a la superficie terrestre. Las fuentes naturales de los precursores de ozono incluyen las emisiones de plantas y suelos, los incendios forestales y los rayos durante las tormentas eléctricas [20].

El ozono es un componente natural de la atmosfera, su concentración a nivel del mar oscila entre 7 y 40 µg/m³, esto es variable debido a que hasta una tormenta puede propiciar la formación de ozono y la luminosidad puede agregarlo a otros contaminantes. Si la contaminación es baja puede reaccionar con las olefinas de los escapes de vehículos de motor y disminuir su concentración por el contrario si la concentración es elevada y la radiación solar intensa el ozono aumenta, puede llegar hasta 1400 µg/m³ [21].

El ozono troposférico, componente básico del esmog, se considera un problema “sin umbral” porque incluso en muy pequeñas cantidades en el aire tiene efectos nocivos en la salud humana, en particular los sistemas cardiovascular y respiratorio. La exposición al ozono se ha vinculado con la mortalidad prematura y

una gama de cuestiones de morbilidad, como admisiones en hospitales y síntomas de asma [22].

2.3 Tipos de emisiones de contaminantes atmosféricos

Las fuentes de contaminación se clasifican en naturales y antropogénicas. Las naturales siempre han existido, mientras que las antropogénicas, como su nombre lo indica, son causadas por las actividades humanas.

Entre las diferentes fuentes de emisiones se clasifican las fuentes móviles de dos tipos, si bien la definición de fuente móvil incluye prácticamente a todos los vehículos automotores, se refiere básicamente a las emisiones de automóviles y camiones [23].

Los motores de los vehículos son los responsables de las emisiones de CO, de COV'S, SO₂, y NO_x, producidos durante la combustión y las fuentes fijas que a su vez se clasifican de la siguiente manera [24]:

- I. Fuentes puntuales: son aquellas derivadas de actividades industriales y de la generación de energía eléctrica.
- II. Fuentes de área: Incluyen la generación de aquellas emisiones inherentes a actividades y procesos, tales como el consumo de solventes, limpieza de superficies y equipos, recubrimiento de superficies arquitectónicas, industriales, lavado en seco, artes gráficas, panaderías, distribución y almacenamiento de gas LP, principalmente.
- III. Fuentes naturales: Se refiere a la generación de emisiones producidas por volcanes, océanos, plantas, suspensión de suelos, emisiones por digestión anaerobia y aerobia de sistemas naturales. En particular a todo aquello emitido por la vegetación y la actividad microbiana en suelos y océanos, se le denomina emisiones biogénicas, cuyo papel es importante en la química de la troposfera al participar directamente en la formación de ozono.

2.4 Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de la calidad del Aire Ambiente

Las normas de la calidad del aire establecen las concentraciones máximas de contaminantes que no deberían estar presentes en el aire y el tiempo de exposición a estos en caso de que se llegara a exceder tal límite, como medida de protección a la salud de la población en especial a los niños, adultos mayores, personas con enfermedades crónicas, etc.

Tabla 1. Normas Oficiales Mexicanas de la calidad del aire

Contaminante	Norma Oficial Mexicana	Dato base utilizado para la evaluación	Exposición	Valor límite	Frecuencia tolerada
Partículas PM₁₀	NOM-025-SSA1-2014	Promedio 24 horas	Aguda	75 µg/m ³ Máximo	No se permite
			Crónica	40 µg/m ³ Promedio anual	--
Partículas PM _{2.5}		Promedio 24 horas	Aguda	45 µg/m ³ Máximo	No se permite
			Crónica	12 µg/m ³ Promedio anual	--
Ozono (O₃)	NOM-020-SSA1-2014	Dato horario	Aguda	0.095 ppm Máximo	No se permite
		Promedio móvil de 8 horas		0.070 ppm Máximo	
Dióxido de azufre (SO₂)	NOM-022-SSA1-2010	Dato horario	Crónica	0.025 ppm Promedio anual	--
		Promedio de 24 hora	Aguda	0.110 ppm Máximo	No se permite
		Promedio de 8 hora	Aguda	0.200 ppm Segundo máximo	1 vez al año
Dióxido de nitrógeno (NO₂)	NOM-023-SSA1-1993	Dato horario	Aguda	0.210 ppm Segundo máximo	1 vez al año
Monóxido de carbono (CO)	NOM-021-SSA1-1993	Promedio móvil de 8 hora	Aguda	11 ppm Segundo máximo	1 vez al año
Plomo (Pb)	NOM-026-SSA1-1993	Promedio aritmético de tres meses	Crónica	1.5 µg/m ³	No se permite

Fuente: <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/4-normas-oficiales-mexicanas-nom-de-calidad-del-aire-ambiente>.

2.5 Efectos de la contaminación ambiental

La contaminación del aire forma parte de la vida moderna, es un residuo de los métodos que utilizamos para producción de mercancías. La causa principal de toda la contaminación del aire es la combustión, y esta es esencial para el hombre. Una población creciente combinada con un alto nivel de vida, ha llevado a una producción y concentración drásticamente intensificada de contaminantes en el aire en áreas localizadas [25].

Es importante señalar que los efectos a la salud dependen del tipo de contaminante, el tiempo de exposición, el estado nutricional y de salud, así como de la carga genética del individuo.

Efectos causados por partículas

Dependiendo de su composición química y estado físico las partículas pueden ser químicamente activas o inertes, pueden causar daños químicos directos, ya sea por la corrosividad intrínseca o por la acción de sustancias químicas corrosivas absorbidas o adsorbidas, por partículas inertes emitidas a la atmosfera. Los contaminantes atmosféricos primarios provienen de muy diversas fuentes, por lo que su naturaleza física y su composición química es muy variada, si bien podemos agruparlos atendiendo a su peculiaridad más característica, su estado físico (caso de partículas y metales), o elemento químico común (caso de los contaminantes gaseosos) [26].

Tabla 2. Efectos a la salud causados por exposición de acuerdo al tipo de contaminante.

Contaminantes	Efectos a la salud
Dióxido de azufre (SO ₂)	Irrita las vías respiratorias. En altas concentraciones puede provocar bronquitis y traqueítis.
Monóxido de carbono (CO)	En altas concentraciones inhabilita el transporte de oxígeno hacia las células. Si se expone prolongadamente puede provocar mareo, dolor de cabeza, inconsciencia e incluso la muerte.
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	Irrita las vías respiratorias. En altas cantidades puede provocar bronquitis y neumonía.
Ozono (O ₃)	Irrita las vías respiratorias. En altas concentraciones reduce la función pulmonar, empeora el asma, inflama las células que recubren los pulmones y pueden agravar enfermedades pulmonares crónicas.
Partículas	Agravan el asma y enfermedades respiratorias

menores a 10 micrómetros (PM ₁₀)	cardiovasculares. Su exposición crónica a altas concentraciones puede provocar un incremento en el riesgo de morbilidad y mortalidad.
Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM _{2.5})	Agravan el asma, reducen la función pulmonar y se asocian con el desarrollo de diabetes. Pueden ocasionar disminución en el tamaño del feto.

Fuente: Organización Mundial de la Salud (OMS)

Las partículas solas o en combinación con otros contaminantes entran a al cuerpo principalmente por las vías respiratoria actuando como un conductor a una sustancia tóxica absorbida, dañando los órganos que intervienen en el proceso respiratorio, ya que, se ha estimado que el 50% de las partículas entre 0.01 y 0.1 penetran las cavidades pulmonares y se depositan ahí [27].

Efectos del CO

El CO es un gas tóxico, la exposición del hombre a elevadas concentraciones de CO puede conducirle a la muerte, pero los efectos de la exposición a niveles reducidos sólo ahora empiezan a conocerse.

Los daños sobre la salud que produce el CO se debe a que al combinarse con la hemoglobina de la sangre disminuye en ésta su capacidad para ejercer su función normal de transporte de oxígeno. La afinidad del CO por la hemoglobina es más de 200 veces superior que la del oxígeno.

Los efectos producidos sobre la salud dependen de las concentraciones de CO en el aire. En orden creciente de concentraciones se aprecian efectos sobre el sistema nervioso, agudeza visual, cambios funcionales cardiacos y pulmonares, dolor de cabeza, fatiga, fallos respiratorios y muerte [28].

Efectos del O₃

Los efectos producidos por el ozono sobre los seres humanos dependen de las concentraciones a las que se exponga. El primer efecto detectado es la irritación de la nariz y garganta. Si se aumentan las concentraciones producen fatiga extrema, falta de coordinación y edema pulmonar. Los experimentos actuales aún no han demostrado que la exposición al ozono a largo plazo a los niveles atmosféricos normales causa enfermedades respiratorias crónicas en el hombre.

El ozono produce lesiones en las plantas, los efectos visibles de estas lesiones son manchas blancas y punteados en las hojas, produciendo una reducción en el

rendimiento de crecimiento, del desarrollo floral y en la maduración del polen. Es de destacar el hecho de que las concentraciones de ozono que producen daños a las plantas se están alcanzando ya en algunas ciudades. Con respecto a los efectos sobre los materiales, se sabe que muchos polímeros orgánicos, incluyendo el caucho y las fibras textiles, son alterados en presencia de pequeñas cantidades de ozono [29].

Algunos contaminantes pueden calentar o enfriar el planeta, uno de los efectos más importantes es el cambio climático provocado por los gases de efecto invernadero que capturan la radiación solar de tal manera que la temperatura de la tierra aumenta [30]. Sin embargo otros contaminantes como los aerosoles provenientes del humo de los coches, chimeneas y de partículas que despiden volcanes e incendios forestales, bloquean la radiación solar provocando un enfriamiento temporal del aire.

3. Métodos y datos

3.1 Colección de datos

Los datos observados fueron obtenidos del Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA) el cual es una serie de programas informáticos que permite recabar información sobre la calidad del aire [31].

Los datos modelados fueron obtenidos de WRF Ncep-NCAR GRIB DATA la base de datos utilizada fue NCEP North American Mesoscale (NAM) ds609.0, los cuales son específicos para América del Norte, con las siguientes características:

- Resolución espacial: 12 Km
- Resolución temporal: Cada 6 horas

3.2 Identificación del periodo a estudiar

El SINAICA (Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire), es un programa que almacena y difunde información acerca de la calidad del aire que se genera en las estaciones de monitoreo de diversos estado del país [32].

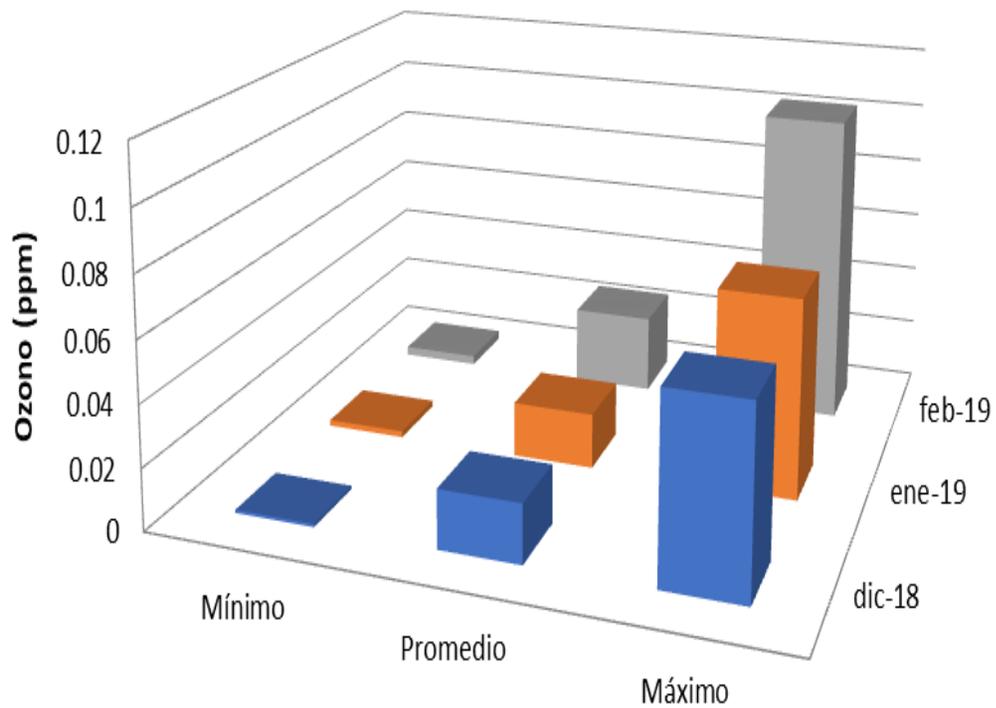
Se eligió una estación representativa, que se estuviera al centro de Monterrey. En la imagen 2 se muestra la ubicación de las 8 estaciones que se encuentran en la ZMM con datos suficientes para la simulación, se puede observar que Obisado se encuentra al centro de Monterrey.

De la base de datos del SINAICA, se obtuvieron datos representativos de la calidad del aire en Monterrey para el ozono, ya que es uno de los principales

productos de la quema incompleta de combustibles fósiles proveniente de motores del transporte tanto público como privado.

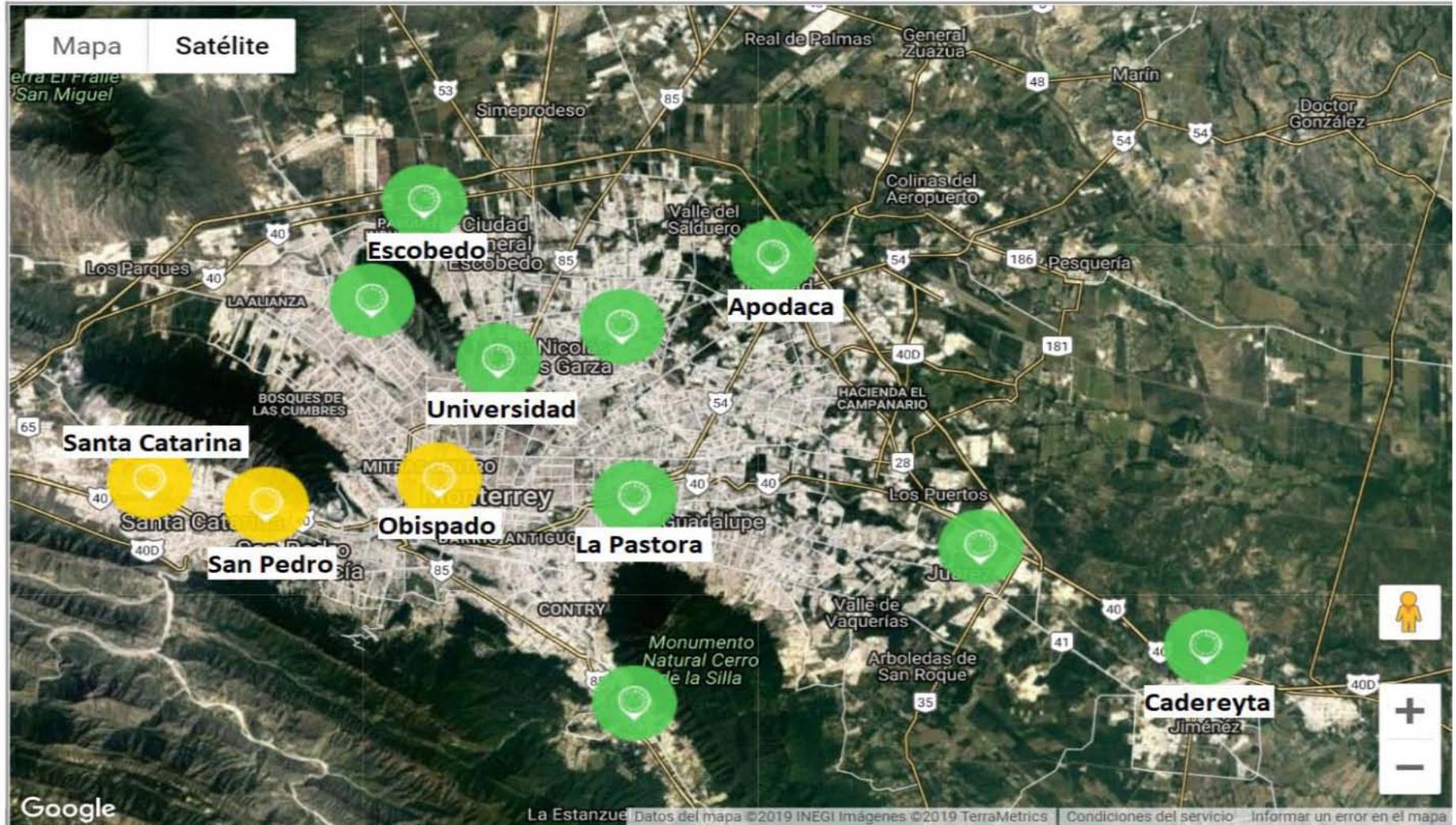
En la gráfica 1, se puede ver cómo va aumentando la concentración de ozono de diciembre del 2018 a febrero del 2019, siendo este último el mes en presentar una concentración máxima de 103 ppm lo cual se está por arriba de 0.095 ppm que es el límite máximo permitido de acuerdo a la NOM-020-SSA1-2014 (tabla 1).

Gráfica 1. Concentración de ozono en Obispado.



	Mínimo	Promedio	Máximo
■ dic-18	0.001	0.019	0.06
■ ene-19	0.002	0.018	0.065
■ feb-19	0.003	0.026	0.103

Imagen 2. Ubicación de las estaciones de monitoreo en Monterrey.



Fuente: Google Earth Pro

Se tomaron los datos de monitoreo para el mes de febrero del 2019 y se identificaron las concentraciones más altas de contaminantes como: dióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de nitrógeno (NO), monóxido de carbono (CO), ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂), partículas con un diámetro aerodinámico de 10 y 5 micras, obteniendo en la tabla 3 (se pueden observar los datos de monitoreo del SINAICA en el anexo II):

Tabla 3. Concentraciones máximas de contaminantes para Obispado.

Contaminante	Fecha	Hora	Concentración Máxima
NO ₂	06/02/2019	14:00 pm	0.55 ppm
NO	03/02/2019	12:00 pm	0.91 ppm
CO	15/02/2019	09:00 am	4.46 ppm
O ₃	15/02/2019	16:00 pm	0.103 ppm
SO ₂	06/02/2019	11:00 am	0.008 ppm
PM ₁₀	02/02/2019	17:00 pm	417 μ/m ³
PM _{2.5}	11/02/2019	10:00 am	95 μ/m ³

Fuente: elaboración propia.

Podemos observar en la tabla 3 que el ozono (O₃) y el monóxido de carbono (CO), ambos alcanzan una concentración máxima el 15 de febrero, aunque las partículas también tienen una concentración máxima por arriba de la NOM-025-SSA1-2014 (tabla 1), pero el periodo de estudio es más grande, además, las principales fuentes de ozono son las centrales eléctricas, los vehículos automotores, los vapores de gasolina y los solventes químicos un contaminante con un periodo de vida corta, tiene como precursores a los COV'S, NO_x, y CO.

El CO presenta un periodo de vida de 0.3 a 5.7 años este último es producto de la quema incompleta de combustibles fósiles al estudiar estos contaminantes se puede corroborar con el cociente O₃/CO la eficiencia del modelo en cuanto a la identificación del origen de las emisiones.

Para analizar las causas o consecuencias de estos principales contaminantes producto de las actividades que se realizan cotidianamente en Monterrey se analizó un día antes y dos días después de la concentración máxima lo que comprende el periodo del 14 al 16 de febrero.

Después de la identificación del periodo de estudio, se ubicaron estaciones estratégicas para cubrir toda el área de Monterrey, que estuviera en la base de datos crudos del SINAICA, de los cuales solo 8 estaciones (imagen 2) para CO (Apodaca, Escobedo, Universidad, Santa Catarina, San Pedro, Obispado, Pastora y Cadereyta) y 6 estaciones para O₃ (Universidad, Santa Catarina, San Pedro,

Obispado, Pastora y Cadereyta) presentaban datos suficientes para realizar la simulación de la calidad del aire.

3.3 Modelo WRF

El Weather Research and Forecasting model (WRF) es un novedoso modelo meteorológico no-hidrostático desarrollado a partir de la colaboración de prestigiosos centros de investigación internacionales (NCAR, NOAA, etc).

El modelo resuelve en una escala regional las ecuaciones dinámicas primitivas considerando la conservación de los flujos escalares y de masa a partir de condiciones iniciales y de contorno obtenidas de modelos de circulación global. Para ello, cuenta con varias estructuras dinámicas y numerosas parametrizaciones físicas que permiten representar distintos procesos, permitiendo aplicarlo en diferentes escalas que van desde las decenas hasta los miles de kilómetros [33].

Modelos físicos

Las opciones físicas del modelo WRF están divididas en 5 categorías, las cuales pueden ser elegidas y modificadas. Las categorías se describen brevemente a continuación [34]:

- a) Microfísica: Esquemas simplificados para simulaciones idealizadas y esquemas complejos que incorporan explícitamente procesos de precipitación, vapor de agua y nubes.
- b) Parametrizaciones de cúmulos: Esquemas ajustados y de flujo-masa al modelado de mesoescala.
- c) Física de la superficie: Modelos de superficie multicapa que van desde un simple modelo termal a un completo modelo de vegetación y humedad del suelo, incluyendo cobertura de nieve y hielo marino.
- d) Física de la capa límite del planeta: Predicción de energía cinética turbulenta.
- e) Física de la radiación atmosférica: Esquemas de ondas cortas y largas con bandas multispectrales, un esquema simple de onda corta adecuado para aplicaciones meteorológicas. Los efectos de nubes y flujos de la superficie son también incluidos.

3.3.1 Modelo WRF-CHEM

El modelado de los procesos químicos en los sistemas de calidad de aire se realiza independientemente del modelado meteorológico, esto es, realizando una integración “off-line” de los mecanismos químicos sobre una malla externa que contiene información sobre el transporte de masa y los campos meteorológicos.

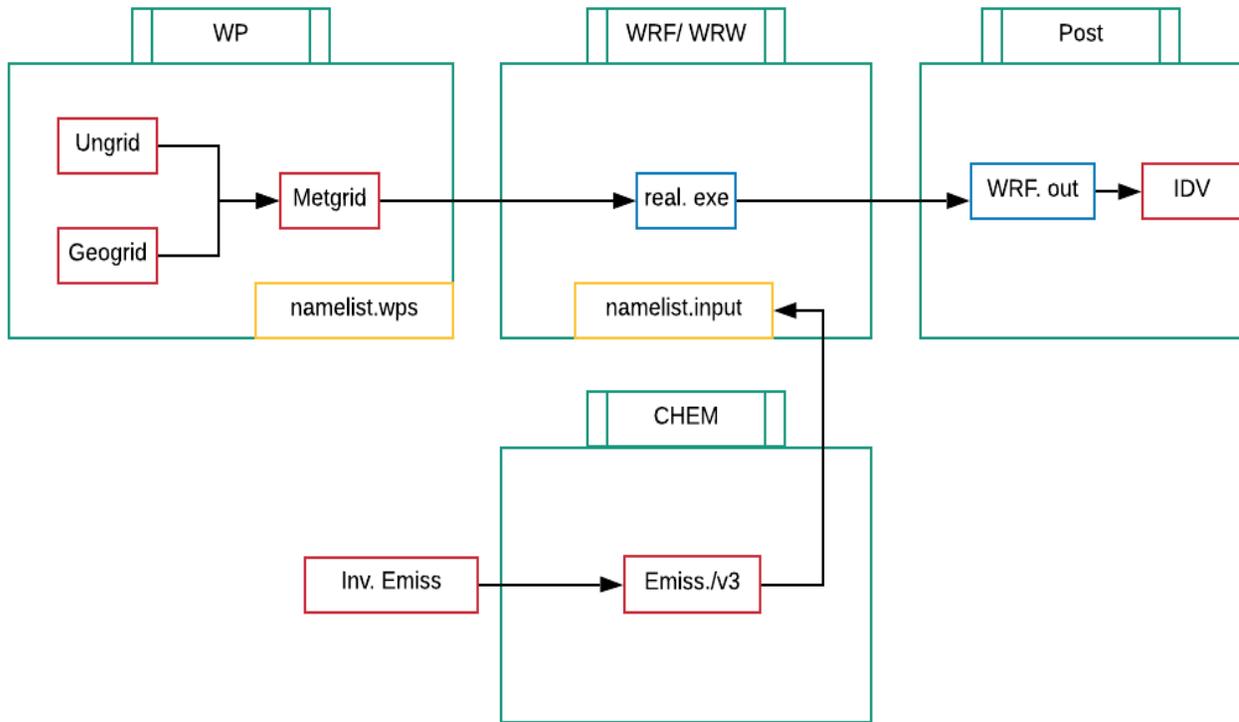
El desarrollo del novedoso modelo químico de transporte (CTM, Chemical Transport Model) WRF-CHEM (WRF) ha permitido realizar la modelación acoplada de la química y la meteorología dentro de un único sistema de coordenadas horizontales y espaciales. Esto permite configurar una amplia gama de parametrizaciones químicas y físicas sin necesidad de interpolarlas en dominios espacio-tiempo diferente.

El modelo WRF-CHEM posee una estructura modular que permite considerar una variedad de procesos fisicoquímicos acoplados como son: el transporte, la deposición, la emisión, la transformación química, la interacción con los aerosoles, los procesos de fotólisis, la transferencia radiactiva, etc.. Sus aplicaciones en distintos campos permiten explicar episodios pasados, evaluar los potenciales efectos de las diferentes estrategias de reducción de emisiones o realizar pronósticos de la calidad del aire, considerando la interacción entre la química y la meteorología de alta resolución.

El modelo WRF-CHEM ha sido utilizado para determinar la concentración de ozono en regiones topográficamente complejas, obtener la variación espacio-temporal de contaminantes para distintos escenarios de emisión, estimar el transporte y deposición de sustancias ácidas y tóxicas, por ello se utilizó este modelo para estimar la calidad del aire en Monterrey-Saltillo.

En la figura 1 presenta cada uno de los pasos a seguir para realizar la instalación del modelo WRF- CHEM: Inicialmente se requiere la instalación del sistema operativo, compiladores y diversas librerías, posteriormente se instala el modelo [35].

Figura 1. Estructura WRF-CHEM



Fuente: Guía WRF-Chem Version 3.9.1.1.

3.4 Formulación del modelo

El modelo de Investigación y Predicción Meteorológica (WRF) está diseñado para ser aplicado tanto en pronósticos operativos del tiempo, como en investigación de fenómenos meteorológicos. Es un modelo de simulación de la atmósfera de área limitada, no hidrostático (con opción hidrostática), sensible a las características del terreno y diseñado para predecir la circulación atmosférica a escala sinóptica, mesoescalar y regional.

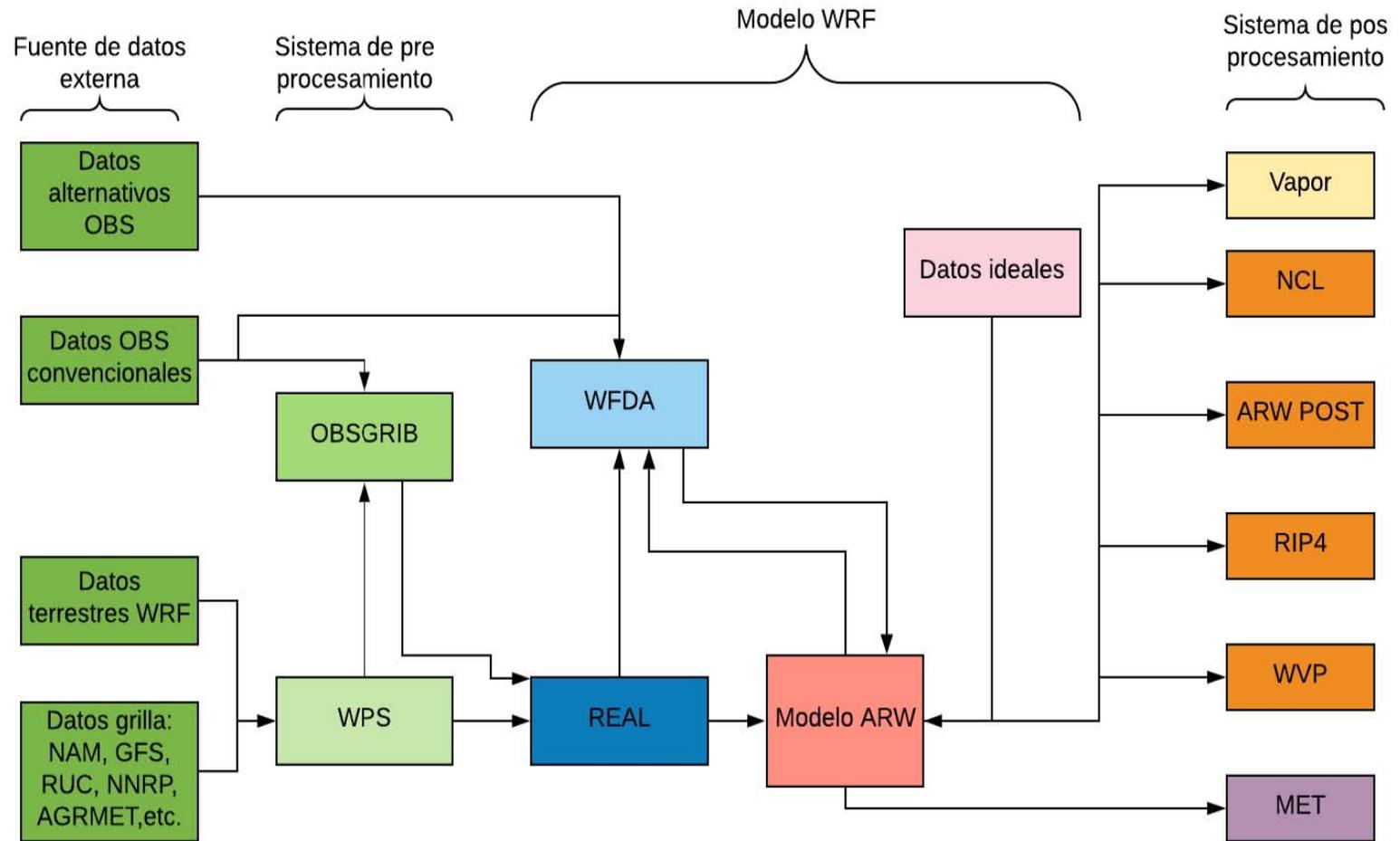
WRF puede generar simulaciones atmosféricas utilizando datos reales (predicción numérica del tiempo real) o condiciones idealizadas, modelación de la calidad del aire.

3.4.1 Componentes del modelo WRF

Como se puede observar en la Figura 2, el sistema de modelado WRF consiste en estos programas principales [36]:

- a) The WRF Preprocessing System (WPS)
- b) WRF-DA
- c) ARW solver
- d) Post-processing & Visualization tools.

Figura 2. Componentes del modelo

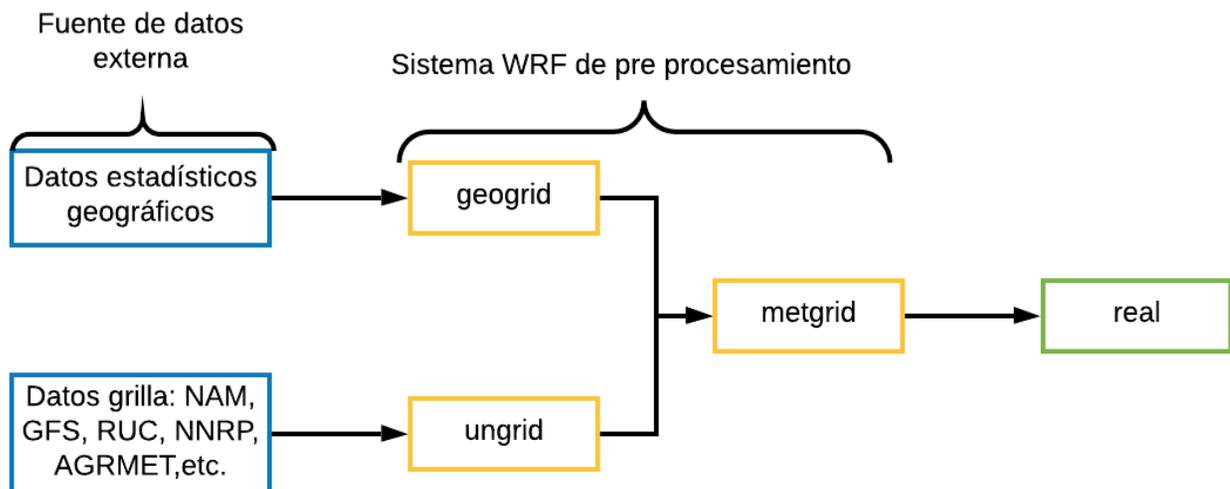


Fuente: Guía WRF-Chem Version 3.9.1.1

El WPS consta de tres programas independientes [37]:

- a. Geogrid: Este programa calcula la posición de los puntos de rejilla de acuerdo a las especificaciones de resolución, número de puntos, posición del centro, etc, provistas por el usuario. Una vez posicionados los puntos de la rejilla, interpola los datos de topografía, uso de suelo, tipo de suelo, albedo, cobertura vegetal y demás datos que en el futuro puedan ser utilizados por el modelo.
- b. Ungrid: Este programa permite decodificar datos que vienen en formato grib y escribirlos en el formato que pide el programa metgrid para que puedan ser interpolados a la rejilla del modelo WRF.
- c. Metgrid: Este programa interpola horizontalmente los datos de atmósfera extraídos por el programa ungrid a la rejilla definida por el programa geogrid. Por ejemplo, puede tomar un análisis y un pronóstico global e interpolarlo a la rejilla del modelo. El trabajo de interpolación vertical para WRF se lleva a cabo dentro del programa real.

Figura 3. Flujo de datos entre los programas del WPS



Fuente: Guía WRF-Chem Version 3.9.1.1.

Sistema de WRF

Este es el componente clave del sistema de modelado, está compuesto de varios programas de iniciación para simulaciones de casos ideales o reales, y un programa de integración. Hay dos solucionadores dinámicos en el WRF:

Núcleo ARW (Advanced Research WRF)

El ARW ha sido ampliamente desarrollado y mantenido por el Laboratorio de MMM (Mesoscale and Microscale Meteorology) del NCAR. Entre las aplicaciones de este modelo se encuentran [38]:

- NWP en tiempo real Simulaciones idealizadas (convección, ondas baroclínicas).
- Investigación sobre el clima regional.
- Investigación en el desarrollo de nuevas parametrizaciones.
- Investigación y desarrollo en la asimilación de datos.
- Investigación y desarrollo en el pronóstico del tiempo.

ARW SOLVER

Es el proceso central, donde se llevan a cabo la preparación de los datos del pre-procesamiento y el cálculo e interpolación de acuerdo a las ecuaciones definidas para las diferentes variables con respecto al tiempo. Algunas características clave del modelo WRF incluyen [39]:

- 1) Ecuaciones no hidrostáticas completamente comprensibles con opción hidrostática.
- 2) Aplicaciones regionales y globales.
- 3) Malla horizontal de clase Arakawa-C.
- 4) Cuatro proyecciones de mapas son soportados para simulaciones con datos reales: Polares, Lambert, Mercator y Latitud - Longitud.

El código del modelo WRF contiene un programa de inicialización (ya sea para datos reales, `real.exe`, o los datos idealizados, `ideal.exe`; y un programa de integración numérica, `wrf.exe`).

Figura 4. Caso de modelación real.



Fuente: Guía WRF-Chem Version 3.9.1.1.

Figura 5. Caso de modelación ideal



Fuente: Guía WRF-Chem Version 3.9.1.1.

3.4.2 Etapa de procesamiento

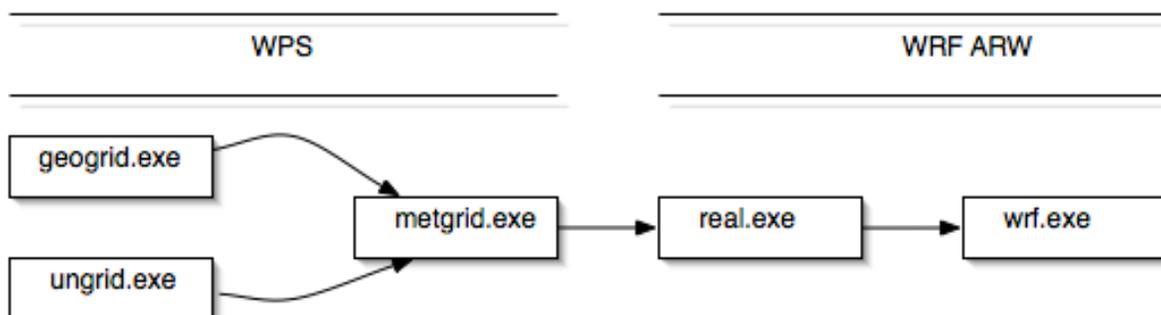
REAL: Realiza la interpolación vertical desde los niveles de presión hasta el sistema de coordenadas normalizadas sigma de WRF. Se trata de la definición de un sistema de coordenadas, que sigue las irregularidades propias del terreno, adaptándose a los distintos tipos de orografía presente en los dominios de predicción.

WRF: El módulo WRF contiene las ecuaciones físicas de pronóstico y diagnóstico que permiten realizar una predicción con un horizonte temporal prefijado. En este módulo se incluyen también las parametrizaciones que permiten describir los fenómenos físicos cuya escala espacial-temporal es inferior a la resolución fijada en las simulaciones.

En esta etapa se corre el modelo. Los dos archivos principales a ejecutar en esta etapa son el real.exe y wrf.exe [40].

1. Ejecutar del programa real.exe, interpola verticalmente los archivos generados por metgrid.exe., crea los datos de la condición inicial y condiciones de contorno, además realiza algunos chequeos de consistencia entre los datos.
2. Ejecutar del programa wrf.exe., aquí se realiza la simulación en base a todo el proceso anteriormente hecho.

Figura 6. Pre-procesamiento y procesamiento.



Fuente: Guía WRF-Chem Version 3.9.1.1.

3.4.3 Salidas de WRF

Las salidas que proporciona el modelo WRF contienen información pronosticada, para un intervalo de tiempo determinado, de diferentes variables meteorológicas. Los ficheros que componen estas salidas cumplen con las especificaciones de un

formato conocido como netCDF. NetCDF (Network Common Data Form) es un conjunto de interfaces de acceso para datos en forma de arreglo y una colección de bibliotecas de distribución libre, para el acceso a datos implementadas para C, Fortran, C++, Java y otros lenguajes. Las bibliotecas proporcionan un formato, multiplataforma, para representar información científica [41].

Post procesamiento WRF proporciona salidas en formato netCDF; sin embargo, esta información es necesario procesarla y generar una serie de gráficas que permitan analizarla y entenderla de una manera visual. Hay un buen número de herramientas disponibles para visualizar la información de modelo WRF. Esta información puede ser visualizada desde cualquier herramienta capaz de reconocer el formato netCDF. Entre las más conocidas destacan GrADS, RIP4, Vis5D, VAPOR y NCL.30 programas SIG como QGIS y ArcGIS son herramientas que también permiten visualizar las salidas del modelo WRF en formato netCDF.

Para el post procesamiento para una mejor visualización de los datos se considera usar R-studio y GrADS.

- R-Studio: Es un conjunto de utilidades de recuperación de datos completamente funcional. Incluye versiones tanto de Windows OS y de Mac OS Linux.
- GrADS: Sistema de análisis y visualización de cuadrícula es una herramienta de escritorio interactiva que se utiliza para facilitar el acceso, la manipulación y la visualización de datos de ciencias de la tierra.

3.5 Evaluación del modelo

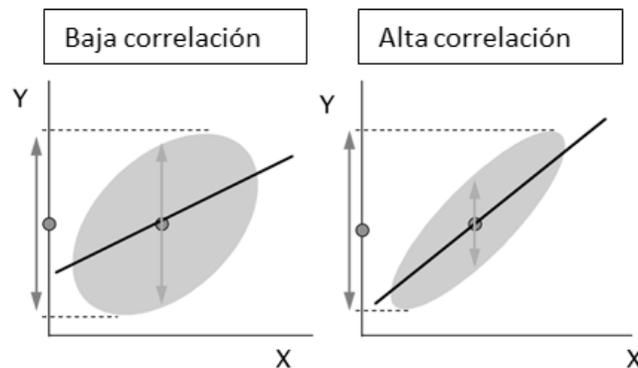
Se realizó la comparación de los datos observados los cuales fueron obtenidos del SINAICA con el modelo WRF-CHEM, mediante un método heurístico, se realizaron 18 modificaciones para acercar al modelo a los datos observados, variando biogénicos, fuentes fijas, puntuales y de área. Se modelaron 24 horas del periodo del 14 al 16 de febrero.

3.5.1 Descripción de las métricas estadísticas

Correlación

La correlación hace referencia al grado de relación entre dos variables. El problema que se plantea es el de encontrar una medida que indique el grado de intensidad de relación entre las variables, se pretende hallar un valor que dé una medida del grado de ajuste de la curva a la nube de puntos [42].

Figura 7. Ejemplo de correlación.



Una manera de obtener esa media es calculando la varianza de los residuos o varianza residual:

$$S_{ry}^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q (y_j - y_i)$$

Covarianza maestra, indica si la posible relación entre dos variables es directa o inversa.

$$S_{xy} = \frac{1}{N} \sum_i (x_i - \bar{x}_i)(y_i - \bar{y}_i)$$

En efecto, cuanto mayor sean las diferencias entre los valores observados y los valores teóricos de la variable dependiente, menor será la intensidad de relación en las variables.

Las variables (descriptores) cuantitativas son utilizadas para medidas paramétricas de dependencia, que son medidas que dependen de los parámetros como la media y la desviación estándar de la frecuencia de la distribución de las variables.

Desviación Estándar

Corresponde a la raíz cuadrada de la diferencia media cuadrática entre el error de pronóstico ($e_n = f_n - o_n$) y el error de pronóstico promedio (\bar{e}). Se utiliza para medir la cantidad de variabilidad en el pronóstico de variables meteorológicas. Cuanto mayor sea el valor de la SD, mayor será la variabilidad del pronóstico [43].

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (e_n - \bar{e})^2}$$

Donde

e_n : Error de la predicción.

N: Número total de la muestra.

Correlación: Nos permite establecer la relación lineal entre los modelos utilizados y la observación (acotada entre -1 y 1).

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - \bar{f})(o_n - \bar{o})}{\sigma_f \sigma_o}$$

F_n : Corresponde al valor de la predicción.

O_n : Valor de la observación.

N: Número total de la muestra.

Coefficiente de correlación de Pearson

Tiene como objetivo medir la fuerza o grado de asociación entre dos variables aleatorias cuantitativas que poseen una distribución normal bivariada conjunta, el coeficiente de correlación general de Pearson se representa con la siguiente fórmula [44]:

$$R = \sqrt{1 - \frac{S_{ry}^2}{S_y^2}} \text{ por lo tanto } -1 \leq R \leq 1$$

Interpretación:

Coefficiente	Tipo de correlación
0 < R < 1	Positiva (será mejor cuando se aproxime a 1).
-1 < R < 0	Negativa.
R = 1	Positiva perfecta (las variables varían en el mismo sentido).
R = -1	Negativa perfecta (las variables varían en sentidos opuestos).
R = 0	Sin correlación (no hay ningún tipo de dependencia).

Coefficiente de correlación lineal de Pearson

Cuando la regresión es una dependencia lineal al coeficiente de Pearson se le conoce como coeficiente lineal de Pearson, es decir, que no depende de las unidades de medida, proporciona una medida del grado de aproximación de la recta de regresión a la nube de puntos. El coeficiente se define por la siguiente fórmula:

$$r = \frac{S_{xy}}{S_x S_y} \text{ donde } -1 \leq r \leq 1$$

Por lo que:

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}{n - 1} \text{ y } S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}{n - 1}$$

- Si $r=0$ la correlación es nula y las rectas son paralelas a cada uno de los ejes y perpendiculares entre sí.
- El signo r señala la dirección de la correlación.
- $r=1$ indica que la correlación es perfecta.
- El mayor valor de r es 1 se trata de una correlación positiva perfecta por lo que todos los puntos de la nube están sobre la recta.
- El menor valor de r es -1 se trata de una correlación negativa perfecta, lo cual significa que las pendientes son negativas.

Si la variable es aleatoria bidimensional (X, Y) toma los valores (xi, yi) con frecuencia absoluta 1, el cálculo del coeficiente lineal de Pearson es de la siguiente manera:

$$r = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - (\sum_{i=1}^N x_i)(\sum_{i=1}^N y_i)}{\sqrt{[N \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)][N \sum_{i=1}^N y_i^2 - (\sum_{i=1}^N y_i)]}}$$

Cuando las variables cuya relación de dependencia que tratamos de averiguar no son continuas, bien porque lo sea una de ellas, ninguna o porque lo que interesa no es la relación entre dichas variables, si no el orden en que aparecen sus valores, se utilizan otras correlaciones como las de Spearman.

Coeficiente de correlación de Spearman

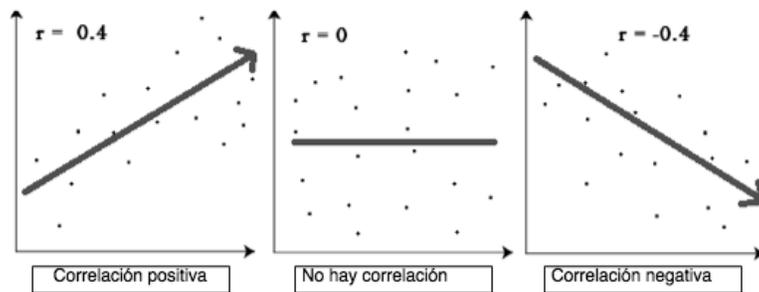
Cuando los datos proporcionados por los valores de la variables no vienen dados por frecuencias absolutas, sino por el orden que estas ocupan en la observación, resulta más difícil medir la intensidad de la relación, puesto que se tiene menos información sobre las variables, en este caso se utiliza el coeficiente de correlación gradual o coeficiente de Spearman r_s que viene dado por [45]:

$$r_s = \frac{6 \sum_{i=1}^N d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

N: Número de datos.

d_i : Es la diferencia de los valores de X y Y el cual se obtiene del coeficiente de correlación de Pearson.

Figura 8. Tipos de correlación



En la figura 8, un valor positivo alto de r_s indica una fuerte tendencia hacia la igualdad de los números de orden asociados, mientras que un valor muy negativo de r_s indica una fuerte tendencia hacia la desigualdad de los ordinales asociados. El valor cero significa que no existe relación entre los dos conjuntos de números ordinales.

Diagrama de Taylor

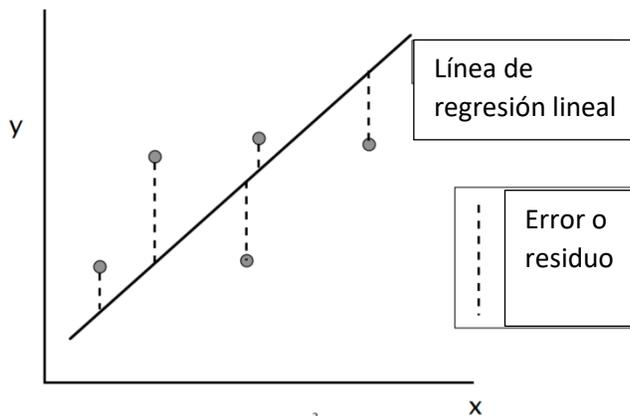
Este tipo de representación permite comparar modelos, por ejemplo varios modelos de regresión, para determinar cuál de ellos es más predictivo. Se utiliza en modelos climáticos. En este tipo de diagramas los modelos se comparan en base al coeficiente de correlación, la amplitud de variación (desviación estándar) y el error cuadrático medio (RMS).

RMSE (muestra el error total del modelo): Corresponde al cálculo de la raíz cuadrada del promedio de las diferencias cuadradas de cada una de los valores del pronóstico (f_n) y la observación (O_n). Este cálculo permite ponderar los errores positivos y negativos, por lo cual en él están incluidos los errores sistemáticos y aleatorios de los modelos.

Un valor positivo alto de **rs** indica una fuerte tendencia hacia la igualdad de los números de orden asociados, mientras que un valor muy negativo de **rs** indica una fuerte tendencia hacia la desigualdad de los ordinales asociados. El valor cero significa que no existe relación entre los dos conjuntos de números ordinales.

Este tipo de representación permite comparar modelos, por ejemplo varios modelos de regresión, para determinar cuál de ellos es más predictivo. Se utiliza en modelos climáticos [46].

Figura 9. Error de la predicción



En la figura 9, el RMSE (muestra el error total del modelo): corresponde al cálculo de la raíz cuadrada del promedio de las diferencias cuadradas de cada una de los valores del pronóstico (f_n) y la observación (O_n). Este cálculo permite ponderar los errores positivos y negativos, por lo cual en él están incluidos los errores sistemáticos y aleatorios de los modelos [47].

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - o_n)^2 \right]^{1/2}$$

Dónde:

F_n : Corresponde al valor de la predicción.

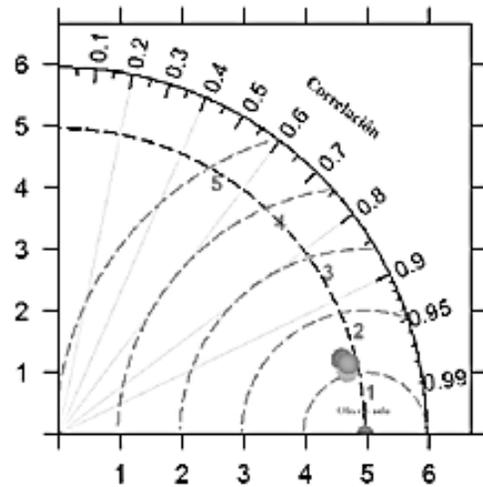
O_n : Es el valor de la observación.

N : Número total de la muestra.

El coeficiente de correlación se muestra en el arco externo de derecho del gráfico (valores de 0 a 1). Los arcos punteados muestran los valores del RMSE. Los valores de los ejes externos (1 al 6) muestran la desviación estándar [48].

El modelo mejor será aquel que tenga un coeficiente de correlación mayor, un valor de RMS más pequeño y que su desviación estándar esté más cerca de la desviación estándar de los valores observados.

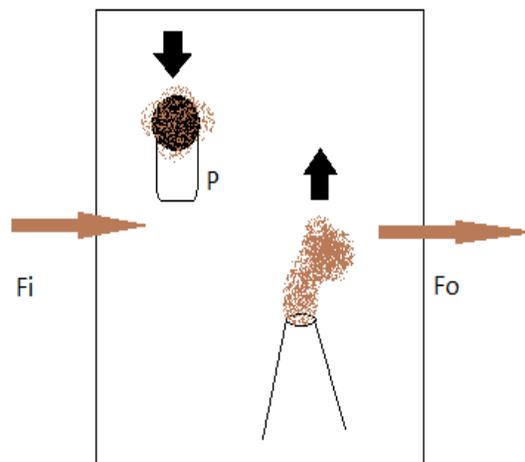
Figura 10. Diagrama de Taylor



3.6 Trayectorias

La dispersión y transporte de los contaminantes atmosféricos se basa en el principio de continuidad-conservación: la variación del interior de una masa depende del flujo de entrada y de salida. Esto aplicado a una masa de contaminantes, al flujo y a las energías cinética y térmica en este caso la baja atmosfera, como se muestra en el esquema [49]:

Imagen 3. Dispersión y transporte de contaminantes.



$$\frac{\Delta M}{\Delta t} = F_i - F_o + F - P$$

Dónde:

M: Masa.

F_i: Flujo de entrada.

F_o: Flujo de salida.

F: Fuente.

P: Pozo o receptor.

Los mecanismos que participan en el transporte de contaminantes son los siguientes [50]:

- Dilución en función de la velocidad del viento.
- Aporte de contaminantes por el viento.
- Arrastre y pérdida de contaminantes por el viento.
- Turbulencia.
- Humedad relativa.
- Gradiente vertical de temperaturas.
- Topografía.
- Precipitaciones
- Reacciones fotoquímicas

3.7 Cociente O₃/CO

El ozono es un contaminante secundario con alto potencial de oxidación, su tiempo de vida es corto, mientras que el monóxido de carbono es un contaminante primario trazador de fuentes de combustión con un tiempo de vida de hasta 0.3 a 5.7 años con una baja reactividad.

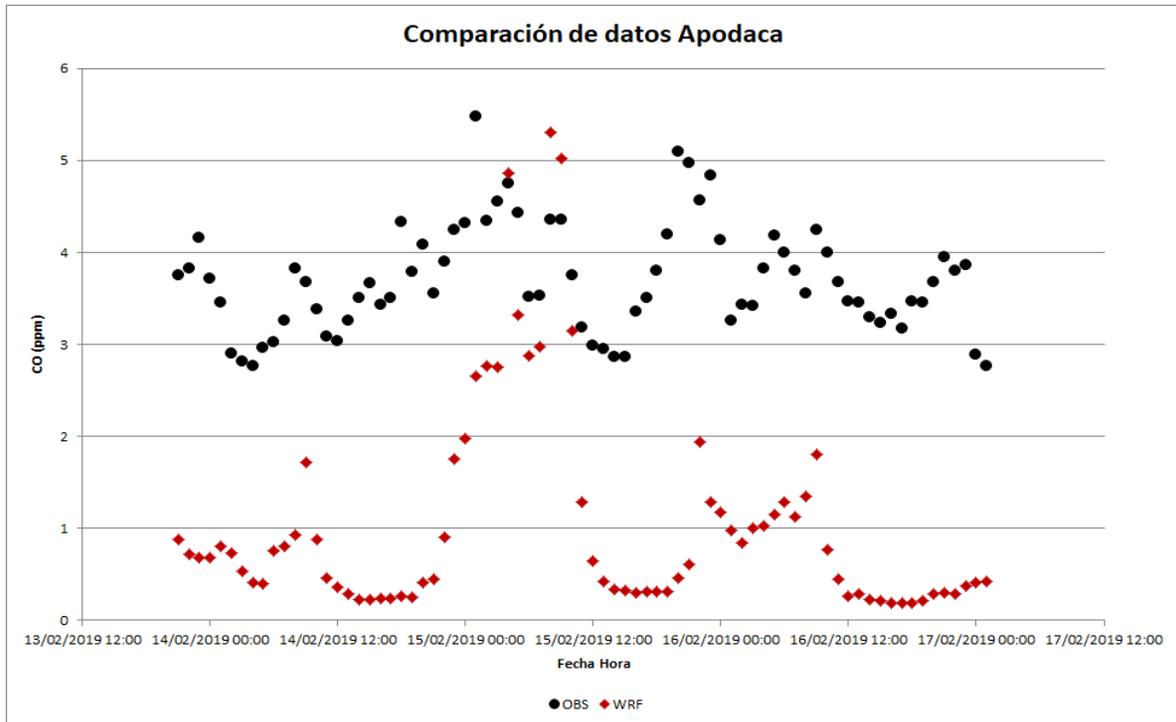
Para saber si las parcelas de aire en Monterrey son parcelas envejecidas (foráneas), es decir que provienen de otro lugar fuera de Monterrey o jóvenes (locales) que se generaron en la ciudad se realizó lo siguiente:

- 1) Se grafican los datos de O₃ vs CO
- 2) Se obtiene la pendiente (O₃/CO)
- 3) Si la pendiente es positiva las parcelas son envejecidas o foráneas, es decir prevalece el monóxido de carbono (CO) en esa zona.
- 4) Si la pendiente es negativa las parcelas son jóvenes o locales, es decir, prevalece el ozono (O₃) en esa zona.

4. Resultados y Análisis

4.1 Análisis del modelo

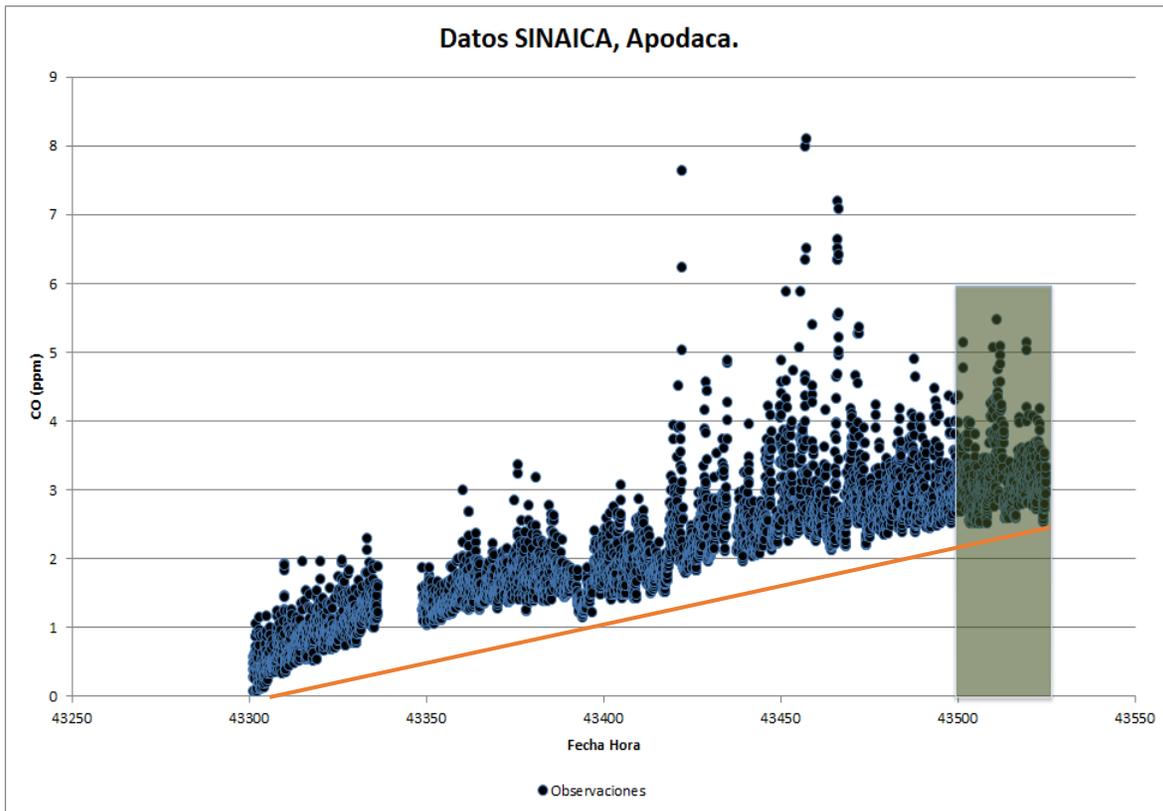
Gráfico 2. Observaciones vs WRF para CO, Apodaca.



Al realizar la simulación de los datos de monóxido de carbono se obtuvieron los resultados del gráfico 2, en el cual se representa de color rojo el modelo WRF-CHEM y de color negro los datos observados, la diferencia entre estos es evidente el modelo está aproximadamente de 2 ppm alejado de las observaciones, se creía que esta diferencia era provocada por las concentraciones de fondo propias de las condiciones medioambientales de la ciudad de Monterrey.

La concentración de fondo en la tierra es de 0.04 a 0.2 ppm por lo tanto, las concentraciones más bajas debían estar cerca de este rango, al menos las concentración de fondo de Monterrey sea distinta a la global, por ello se revisó el inventario de emisiones de SINAICA meses atrás iniciando desde agosto del 2018 hasta febrero del 2019.

Gráfica 3. Datos del SINAICA.



En el gráfico 3 se muestra el inventario de emisiones desde agosto del 2018, la zona sombreada representa el periodo de estudio, si se traza una línea (anaranjada) que toque en las concentraciones más bajas se puede obtener una línea de regresión lineal.

Esta tendencia de los datos a aumentar en el tiempo es provocado porque los equipos de monitoreo tiene un rango de hasta 8 ppm y mientras no esté por arriba de la NOM-021-SSA1-1993 la cual establece un máximo de 11 ppm, los datos de los equipos de monitoreo son enviados por los operadores como datos crudos, es decir, datos que no están revisados, es muy común que este tipo de errores ocurra en las redes de monitoreo por ello utilizaremos un método de ajuste de datos para poder realizar un mejor análisis.

El procedimiento para el ajuste de un modelo de regresión, se realiza siguiendo un flujo de trabajo iterativo de ajustes, sumando, excluyendo términos y observando su contribución al modelo a través de estadísticos de probabilidad asumiendo un intervalo de confianza de 5% para cada variable incluida en el modelo, las variables que no satisfacen esta condición son eliminadas del modelo de regresión.

Este método tiene dos etapas: la primera consiste en una desestacionalización de variables y la segunda es una transformación de variables para eliminar el efecto de correlación entre las variables utilizadas para el modelo de regresión lineal, es necesario realizar una transformación de variables y evaluar nuevamente los supuestos. Cabe señalar que no es necesario tomar los datos de los meses anteriores a febrero, se puede usar para ajustar los datos de solo un mes e incluso de una semana.

Desestacionalizar variables

1. Calcular el promedio de los datos a ajustar:

$$Prom_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}$$

Donde n es el número de datos y x_{ij} el valor de cada uno de los datos.

2. Restar el promedio a cada uno de los datos del mes de febrero:

$$XD_i = x_{ij} - prom_j$$

Donde XD_i es el valor de la variable destacionalizada.

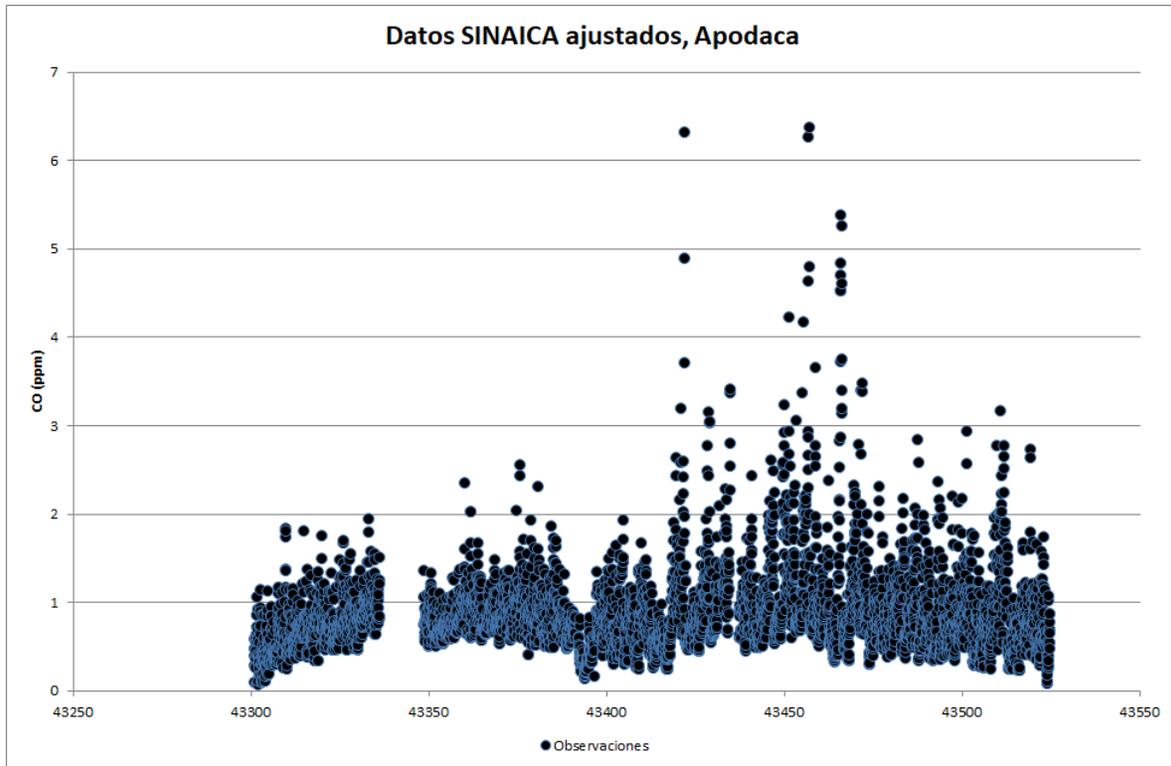
Transformación de variables

1. Se calcula el valor mínimo de XD_i
2. Se suma el valor mínimo a cada uno de los datos de la serie.

$$XD_{ij} = XD_i + |\min(XD_i)|$$

Al aplicar el procedimiento anteriormente descrito se obtiene la gráfica 4 con los datos del SINAICA ajustados. Con ello se pueden realizar una mejor comparación entre el modelo y los datos observados.

Gráfico 4. Ajuste de datos del SINAICA, Apodaca.



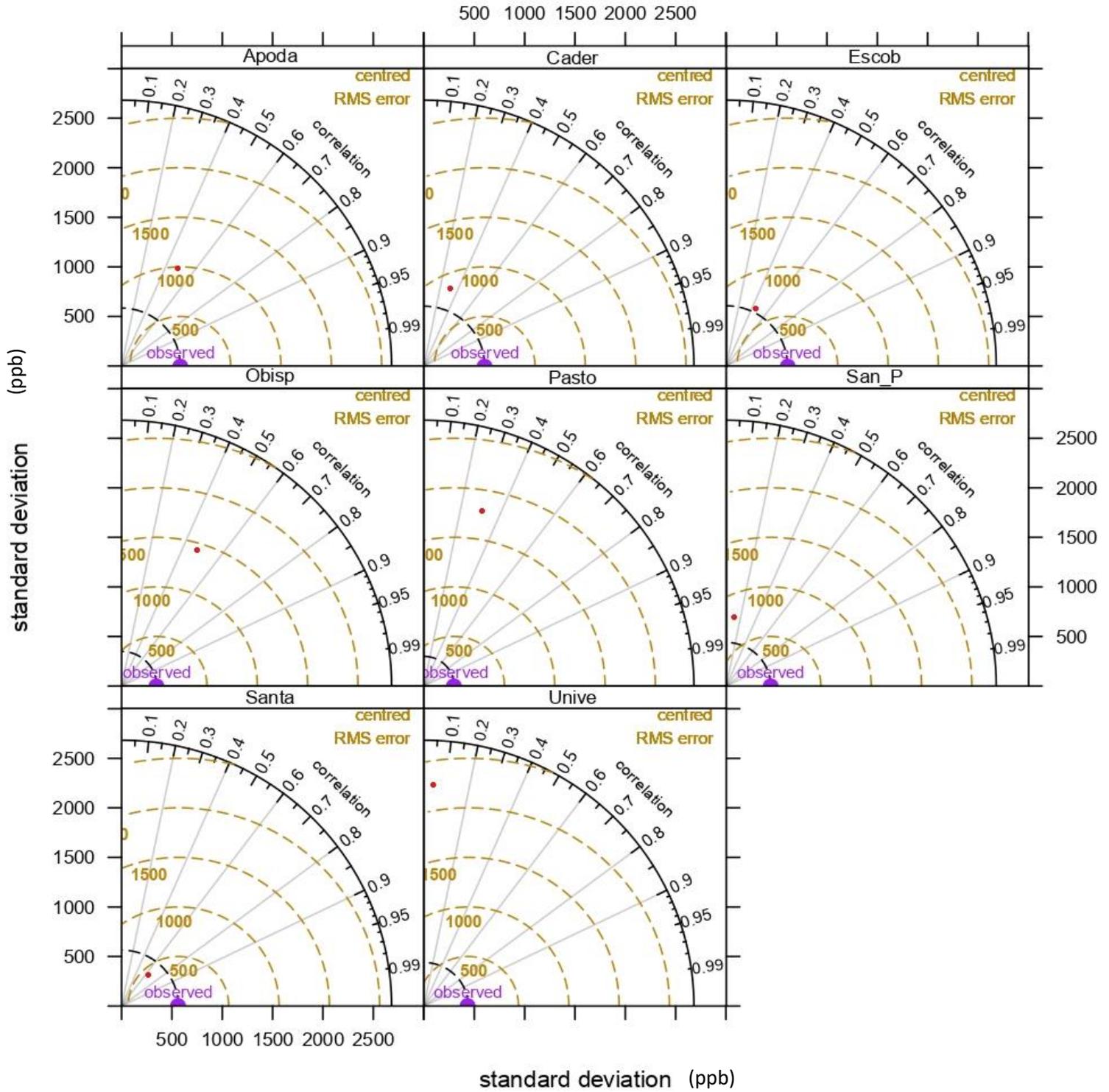
4.2 Evaluación de las métricas estadísticas.

Diagrama de Taylor para el monóxido de carbono (CO)

En el diagrama de Taylor 1, se muestra con un punto de color rojo el modelo WRF-CHEM y el semicírculo morado representa los datos observados. A continuación, se analizan las métricas estadísticas para las 8 estaciones de las que se tienen datos para CO en el SINAICA.

Diagrama de Taylor 1. Comparación de las observaciones vs el modelo para CO (ppb)

OBS vs WRF



Apodaca

Esta estación presenta un RMSE de 1000 ppb o 1 ppm, por ello también se tiene una desviación estándar considerable debido a que los datos están dispersos, sin embargo al observar una correlación de 0.55, indica que existe una relación moderada, es decir, que de acuerdo al anexo III el 17% de los datos del modelo WRF-CHEM están agrupados cerca de la recta de los datos observados.

Cadereyta

Se observa una correlación de 0.35, es una relación de datos menor que Apodaca, sin embargo se tiene un RMSE de 800 ppb o 0.8 ppm y una desviación estándar en donde los datos se encuentran moderadamente cercanos a la media, a pesar de presentar un error y desviación estándar menor que Apodaca en cuanto a la relación de los datos, sólo el 10% de los datos del modelo WRF-CHEM están cerca de los datos observados en referencia a la regresión del gráfico del anexo III.

Escobedo

Presenta un RMSE de 650 ppb o 0.65 ppm, este error es significativo pero es menor en comparación con las estaciones analizadas anteriormente, una correlación mayor a 0.4 la cual es una relación de datos moderada y una desviación estándar cercana a la media, esta estación tiene una mejor aproximación del modelo WRF-CHEM con los datos observados ya que el 20% de los datos están relacionados (anexo III).

Obispedo

Esta estación presenta una buena correlación de 0.5, esto es una mejor relación entre los datos, que Escobedo a pesar de tener un RMSE 1500 ppb o 1.5 ppm aprox., y una desviación estándar alejada de la media muestral, para esta estación los datos del modelos WRF-CHEM se encuentran dispersos, sin embargo de acuerdo al anexo III el 23% de los datos del modelo están relacionados con los datos observados, esto quiere decir que esos datos se encuentran cercanos a línea de tendencia central.

Pastora

Tiene una correlación moderada de 0.31 aprox., sin embargo esta estación tiene un RMSE cercano a 1800 ppb o 1.8 ppm y una desviación estándar alejada de las observaciones, es decir, los datos se encuentran muy dispersos, además el anexo III indica que el 9.7% de los datos del modelo WRF-CHEM se encuentran relacionados con las observaciones, aunque presenta una agrupación de datos diferente al de Cadereyta tienen una similitud en cuanto a la cantidad de datos que están relacionados.

San Pedro

Esta estación presenta una correlación débil de 0.1, un error RMSE de 800 ppb o 0.8 ppm aprox., y una desviación estándar cercana a la media, esto significa que aunque los datos del modelo WRF-CHEM están agrupados cerca de la línea de

tendencia central (anexo III) sólo el 1.5% está relacionado con los datos observados, esto es una relación muy baja.

Santa

Todos los parámetros analizados en el diagrama de Taylor 1 tienen una mejor relación para Santa, se puede ver un RMSE menor a 500 ppb o 0.5 ppm, una correlación de 0.6 y una desviación estándar cercana a la media muestral, por ello los datos del modelo WRF-CHEM se encuentran agrupados cerca de la recta, lo cual se puede corroborar en el anexo III, ya que el 43% de los datos del modelo WRF-CHEM está fuertemente relacionado con los datos observados.

Universidad

En el diagrama de Taylor, esta es la estación en la que el modelo está más alejado de las observaciones, ya que tienen una correlación cercana a 0.05, un error RMSE de 2500 ppb o 2.5 ppm y una desviación estándar alejada de la media muestral, lo cual se ve reflejado en el anexo III con un 0.17% de relación, ya que los datos del modelo WRF-CHEM se encuentran muy dispersos y tienen muy poca o nula relación con los datos observados.

Análisis del modelo para O₃

A continuación se va a examinar el modelo WRF-CHEM con los datos observados (obtenidos del SINAICA) para 6 de las estaciones de Monterrey de las que se tienen datos suficientes para la simulación, teniendo como contaminante al ozono.

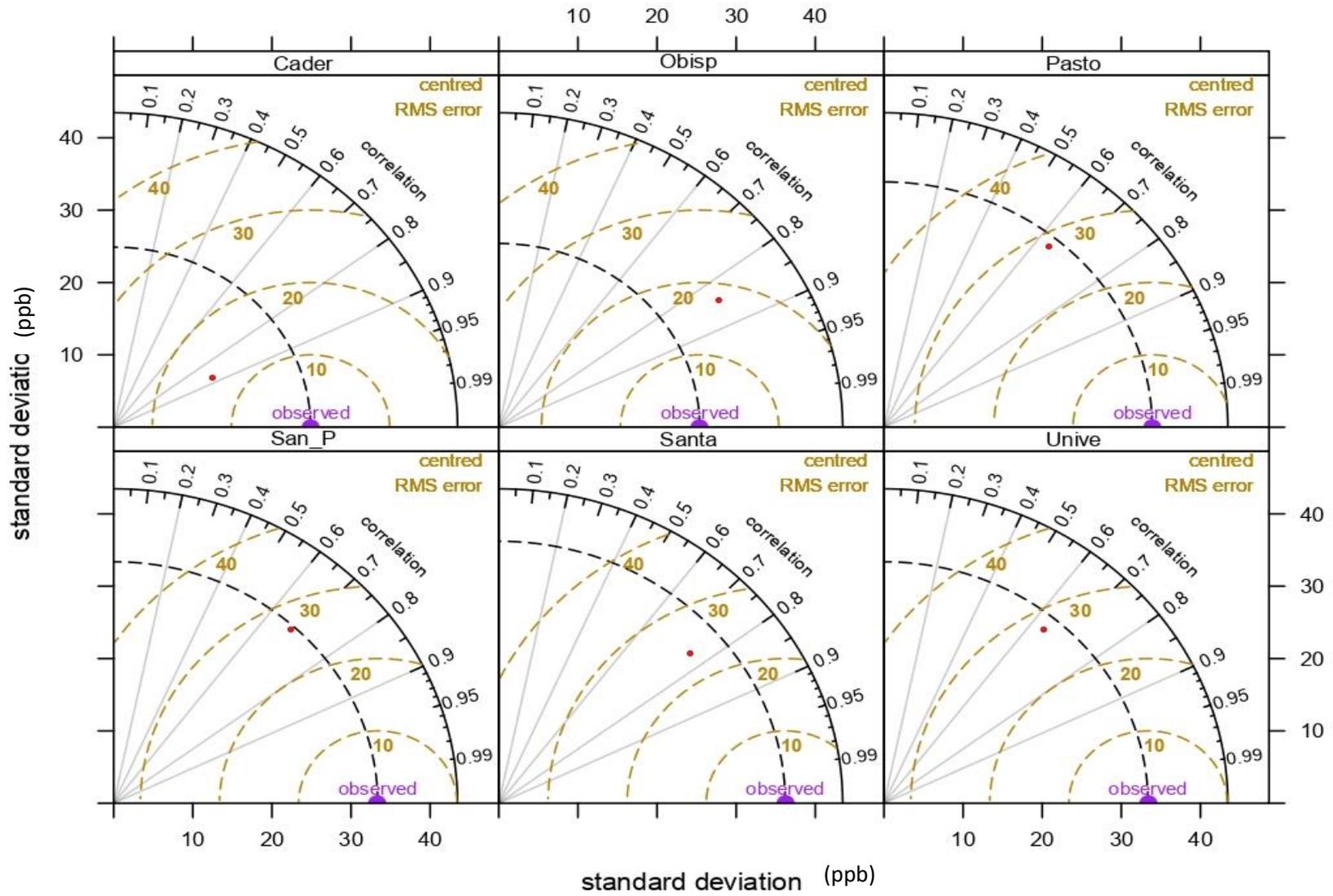
Cadereyta

Esta estación tiene la mejor relación de datos de las métricas estadísticas analizadas para el diagrama de Taylor 2 del ozono con un RMSE de 14 ppb aprox., una correlación de 0.89 aprox., esto quiere decir que el 77% de los datos se encuentran fuertemente relacionados (anexo VII) y la desviación estándar es muy cercana a la media muestral, lo cual indica que la mayor parte de los datos del modelo WRF-CHEM tienden a estar agrupados cerca de los datos observados.

Obispado

La correlación para esta estación es de 0.85, existe una fuerte relación entre modelo WRF-CHEM y los datos observados, tiene un RMSE de 18 ppb aprox., y una desviación estándar cercana a la media muestral por lo tanto el 72 % (anexo VII) de los datos del modelo guardan una importante relación entre sí y se encuentran agrupados cerca de la línea de tendencia central.

Diagrama de Taylor 2. Comparación de las observaciones vs el modelo WRF-CHEM para O₃.



Pastora

Para esta estación se tiene un RMSE de 29 ppb, una correlación de 0.65 y una desviación estándar moderadamente cercana a la media muestral, esto indica que los datos del modelo WRF-CHEM se encuentran dispersos pero el 41% está relacionado directamente con las observaciones de acuerdo al anexo VII.

San Pedro

Tiene un RMSE de 27 ppb menor al de Pastora pero una correlación considerable de 0.7, sin embargo presenta una desviación estándar moderadamente cercana a la media muestral, por lo tanto la mayor parte de los datos del modelo WRF-CHEM se encuentran cerca de la nube de puntos, pero solo el 47% (anexo VII) están relacionados.

Santa Catarina

Se puede observar un RMSE de 24 ppb, una correlación de 0.77 y una desviación estándar cercana a la media muestral por ello podemos decir que los datos del modelo WRF-CHEM están considerablemente relacionados con las observaciones, esto indica que se encuentran moderadamente agrupados en la recta y el 58% según el anexo VII están fuertemente relacionados.

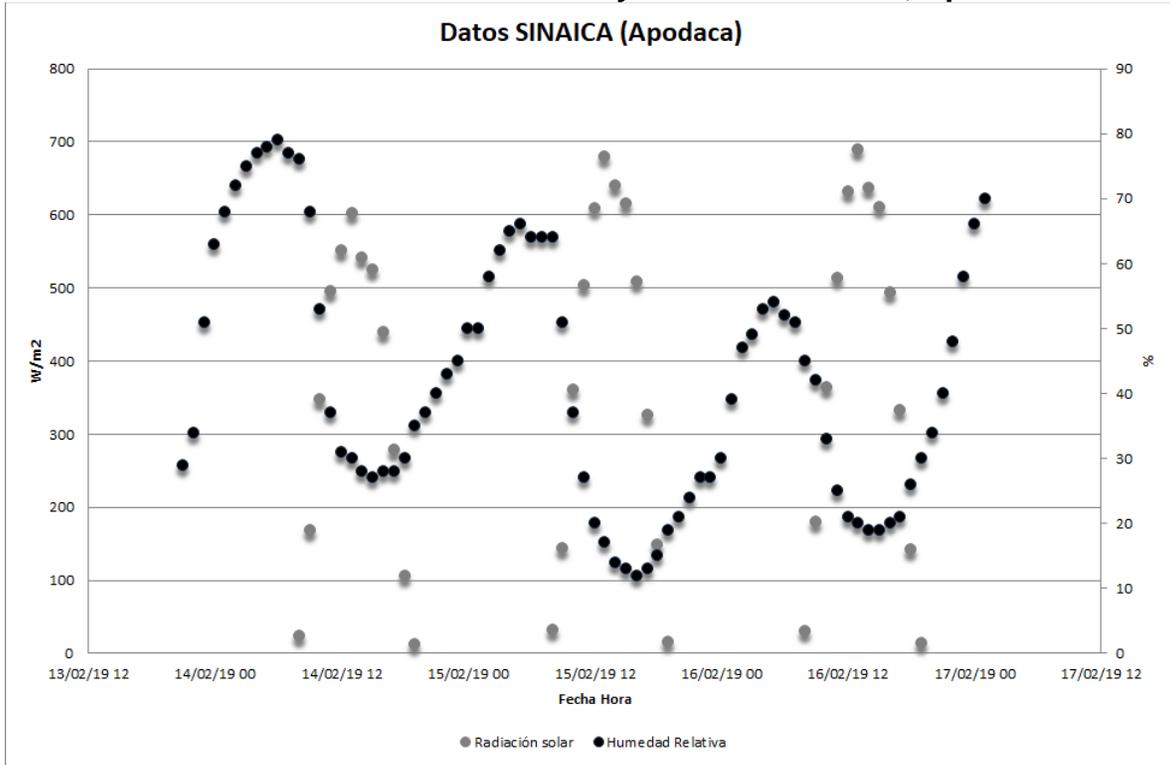
Universidad

Esta estación tiene una desviación estándar moderadamente cercana a la media muestral, un RMSE de 27 ppb considerable en relación con las observaciones, tiene una correlación de 0.65, lo cual significa que para esta estación los datos del modelo WRF-CHEM están moderadamente agrupados cerca de la línea de tendencia central pero solo el 42% (anexo VII) están relacionados con las observaciones, Pastora tiene una correlación igual pero tiene un RMSE un poco mayor por ello, Universidad tiene un 1% más de datos relacionados.

4.3 Análisis del modelo e influencia de la meteorología

Los contaminantes son emitidos por diferentes tipos de fuentes, son distribuidos, transportados, dispersos o concentrados de acuerdo a distintas condiciones meteorológicas y topográficas, lo cual puede aumentar o disminuir sus reacciones con otros contaminantes. Por ello, se analiza cada una de estas variables.

Gráfico 5. Datos Radiación solar y humedad relativa, Apodaca.



Gráfica 6. Observaciones vs WRF, temperatura, Apodaca.

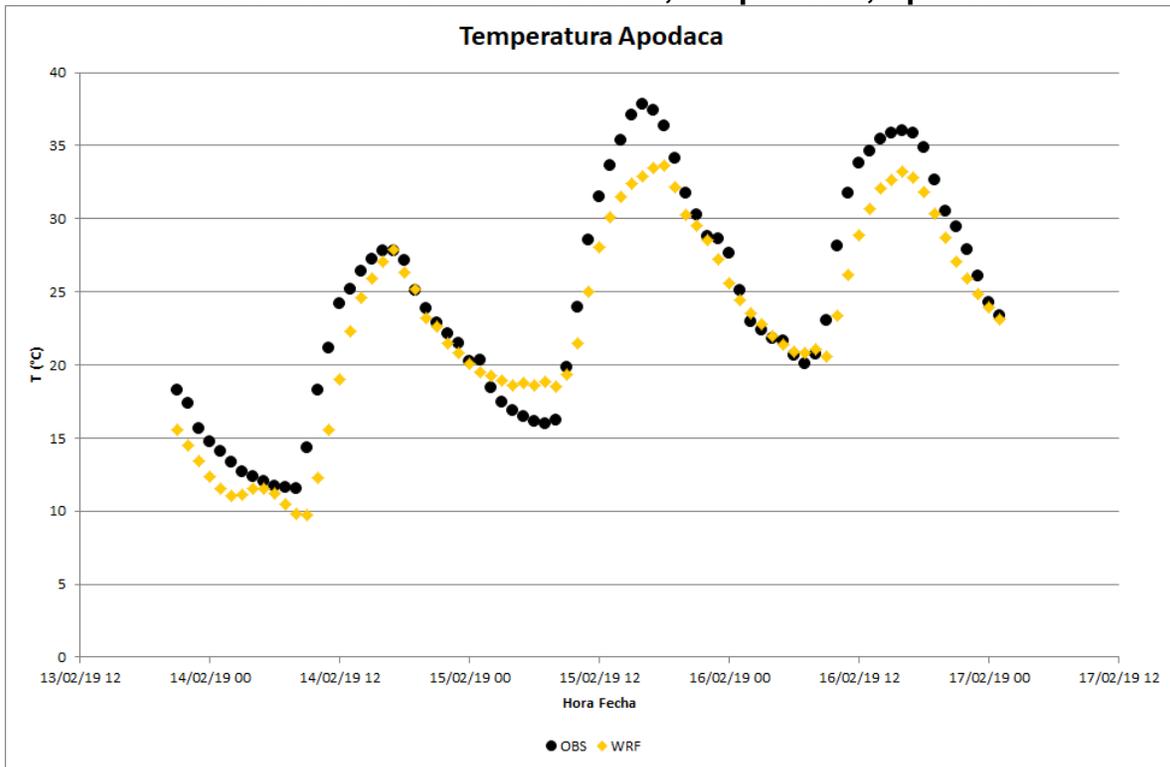
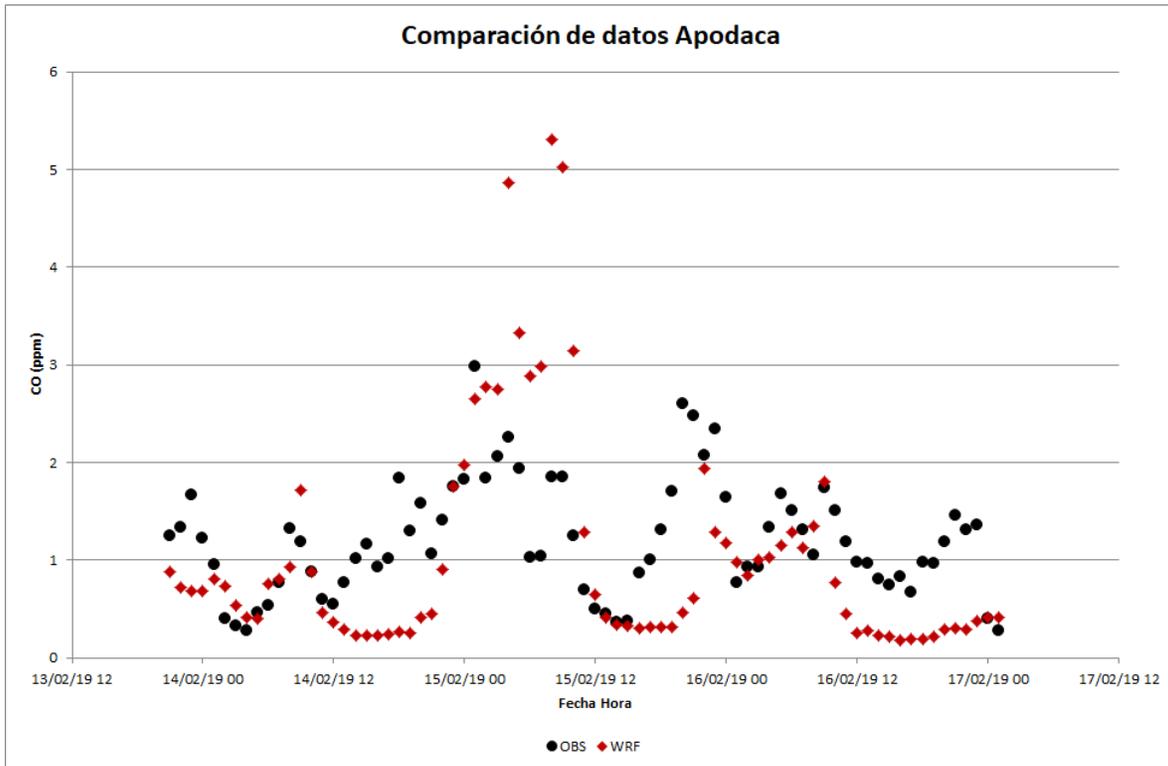


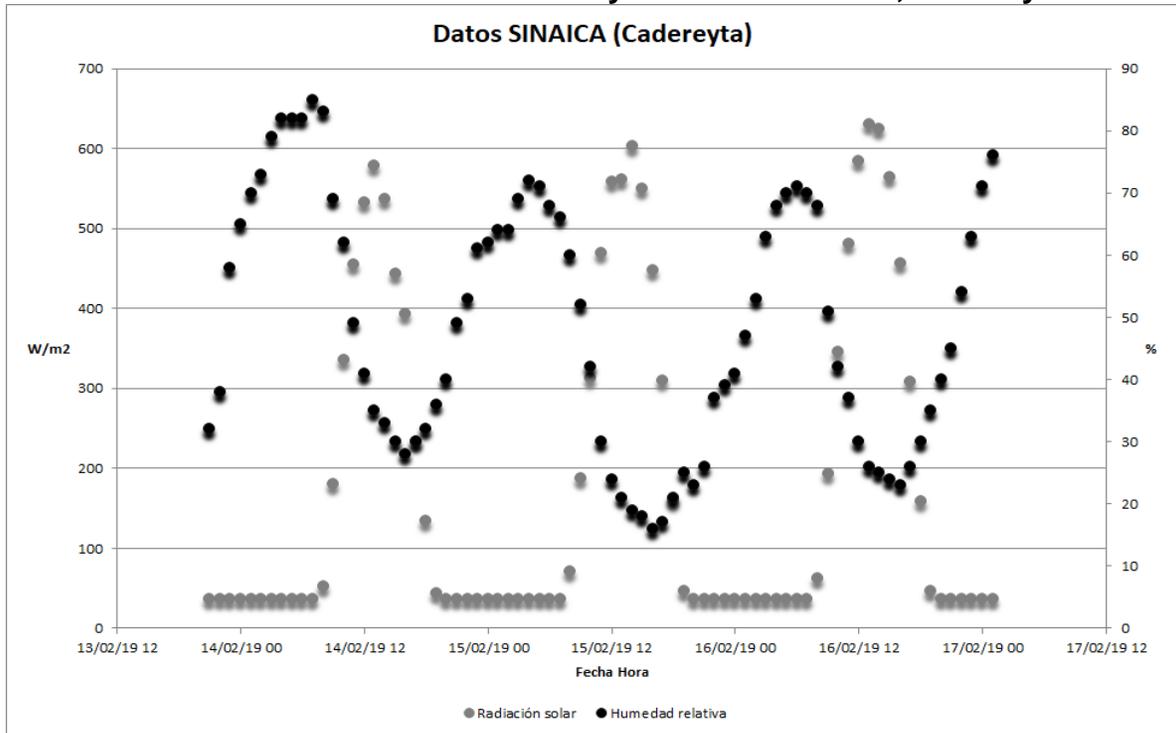
Gráfico 7. Observaciones vs WRF, monóxido de carbono, Apodaca.



Los datos del modelo WRF para la temperatura (gráfico 6) están fuertemente relacionados y agrupados con los datos observados. Mientras que para el CO (gráfico 7) se puede ver una diferencia de magnitud moderada entre los datos observados y el modelo, el día 15 a las 8:00 am hay una diferencia significativa de 3.5 ppm entre los datos observados y el modelo, esto se debe a las fuentes de área o fuentes fijas que se tuvieron que incrementar en los datos del modelo para poder alcanzar las concentraciones de las observaciones cuando se creía que la diferencia de concentraciones se debía a las concentraciones de fondo.

En el gráfico 7, las horas en las que se incrementa la concentración de monóxido de carbono es; para el día 14 a las 6:00 am, para el 15 a las 00:00 am y a las 8:00 pm, para el 16 a las 5:00 y a las 9:00 am, de acuerdo con el gráfico 6 la temperatura registrada en esos horarios y fechas es menor a los 20° C con una humedad mayor al 50% (gráfico 5), a excepción del día 15 a las 20:00 pm en donde la temperatura es de 30°C aprox., y una humedad del 20%, podemos ver en el gráfico 5 que en esas horas no se reportan datos o la radiación solar es muy baja. Se puede inferir que la combustión incompleta combustibles fósiles es la fuente principal de producción de CO, por ello predomina el monóxido de carbono durante mañana y la tarde, sin radiación solar pero con una humedad moderada, la causa de esto puede ser el tráfico automovilístico para Apodaca de acuerdo a las condiciones meteorológicas presentadas que aumentan o disminuyen la concentración del contaminante en cuestión.

Gráfico 8. Datos Radiación solar y humedad relativa, Cadereyta.



Gráfica 9. Observaciones vs WRF, temperatura, Cadereyta.

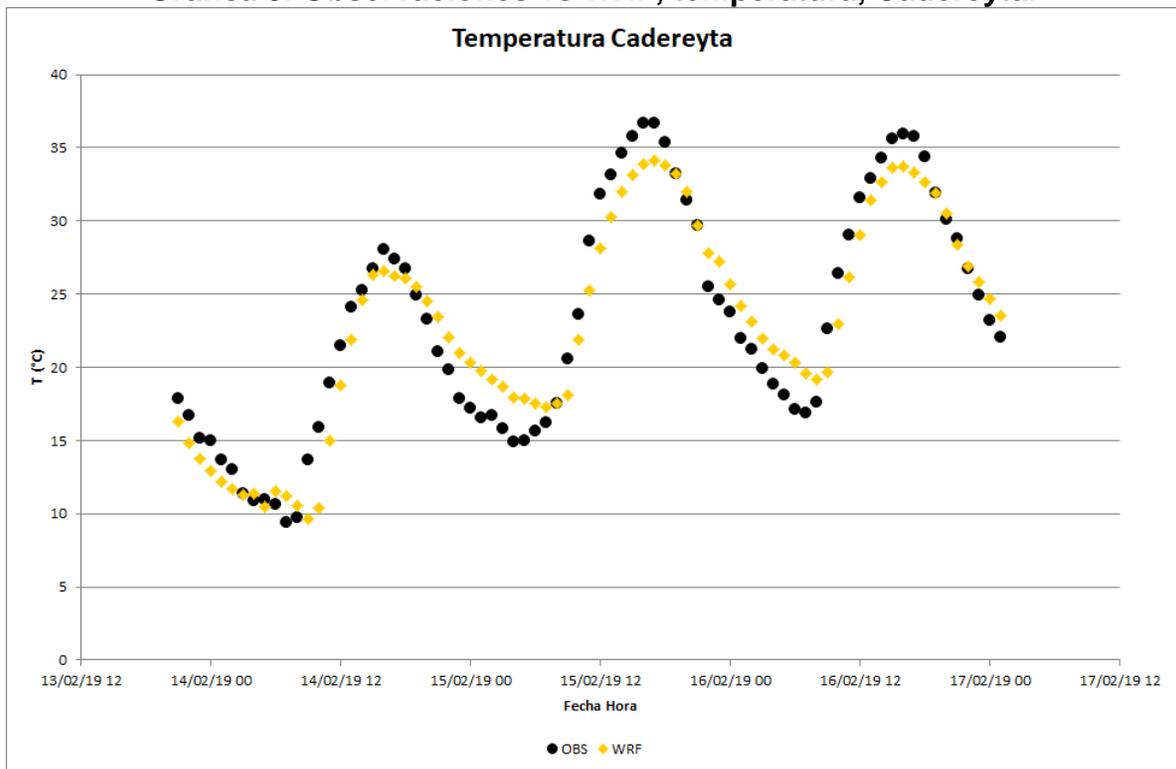


Gráfico 10. Observaciones vs WRF (O₃), Cadereyta.

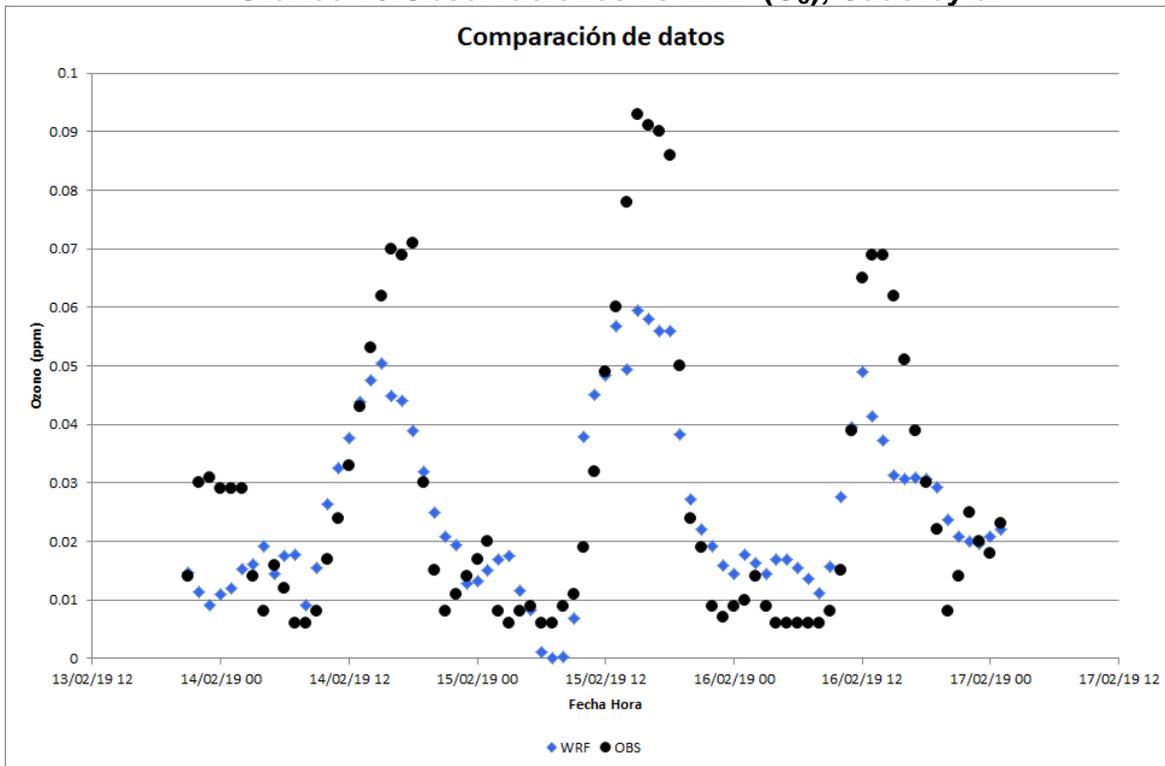
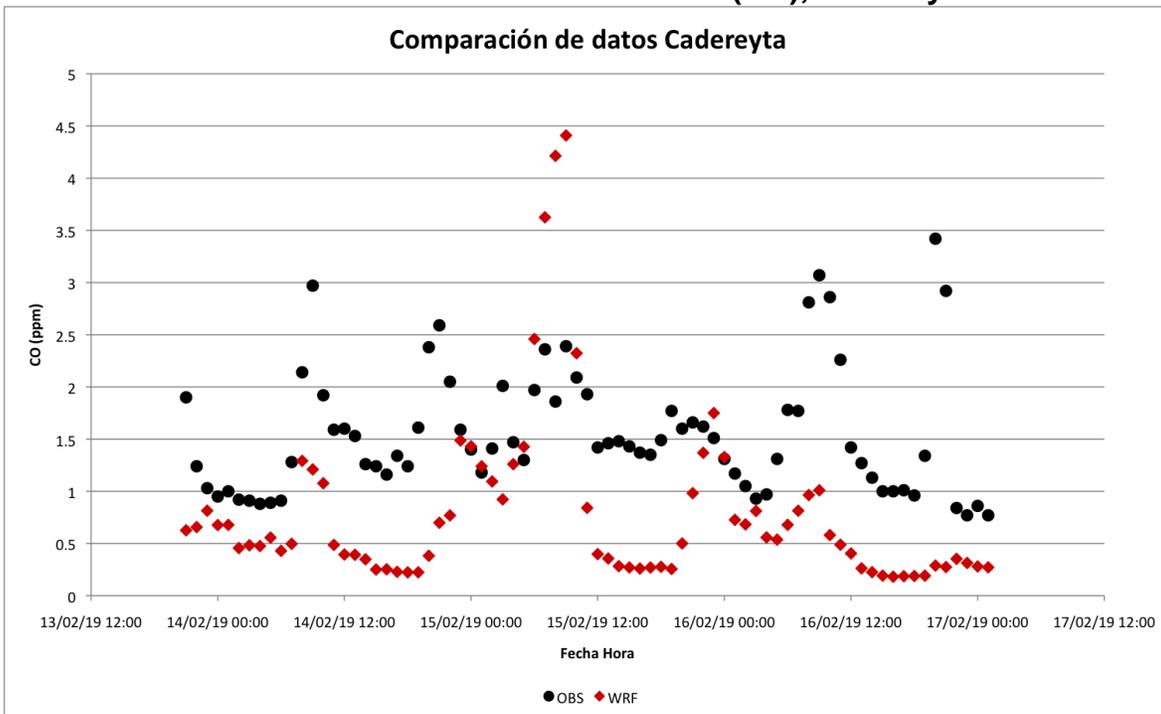


Gráfico 11. Observaciones vs WRF (CO), Cadereyta.



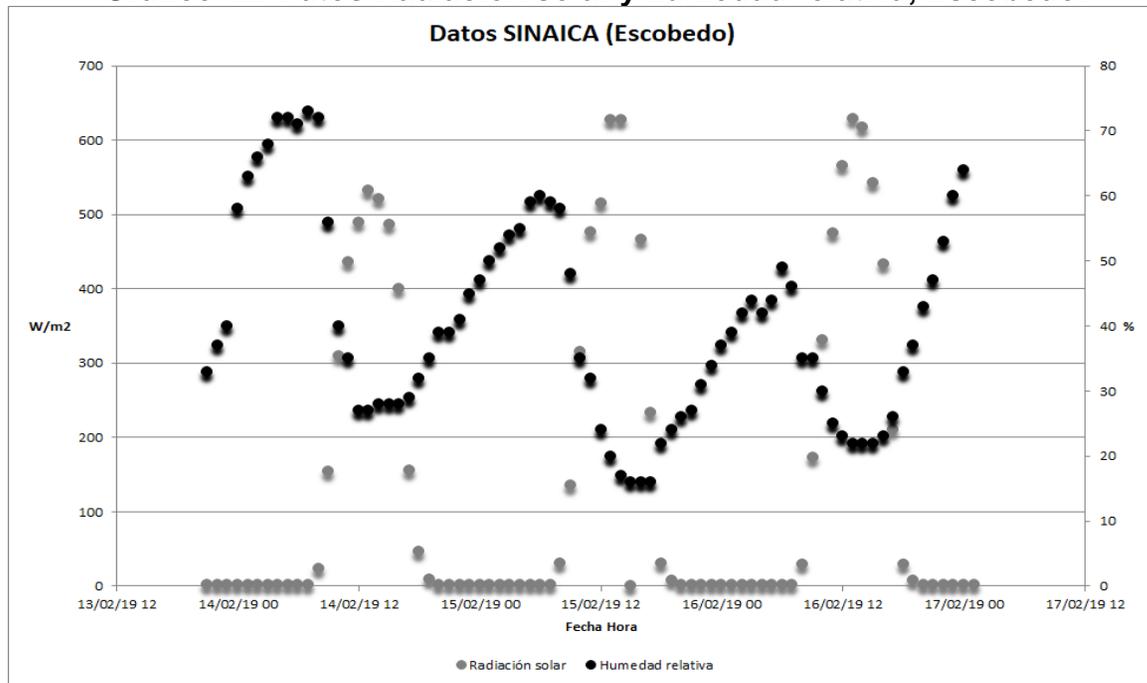
El monóxido de carbono (CO), en el gráfico 11 muestra que los datos del modelo WRF-CHEM están moderadamente relacionados a los observados, sin embargo, presenta concentraciones con una diferencia de 2 ppm el 15 a las 9:00 am, es decir, el modelo se encuentra por arriba o debajo de las observaciones, como se mencionó anteriormente esto se debe a las modificaciones que se le hicieron al modelo para poder alcanzar las concentraciones de las observaciones. En cuanto a la temperatura y el ozono los datos del modelo están mejor relacionados con los observados.

Los días y el horario de concentración máxima de ozono predomina durante la tarde, cuando la radiación solar es más intensa, por ejemplo en el gráfico 10, la concentración máxima se presenta el día 15 es de 0.093 ppb a las 15:00 pm a 30°C (gráfica 9), con una radiación solar de 550 W/m² y una humedad relativa del 18% (gráfica 8), el ozono es de origen fotoquímico y es un contaminante secundario que no se emite como resultado de una actividad concreta pero la radiación solar favorece su formación.

Por otra parte, el CO (gráfico 11) presenta una concentración máxima de 3.445 ppm el 16 de febrero a las 20:00 pm con una humedad del 40% y una radiación solar de 37 W/m², es posible notar que la formación de CO se ve favorecida por condiciones meteorológicas diferentes a las del ozono.

Estación: Escobedo
Altitud: 528 msnm Coordenadas geográficas: 25.80 N, 100.34 O

Gráfico 12. Datos Radiación solar y humedad relativa, Escobedo.



Gráfica 13. Observaciones vs WRF, temperatura, Escobedo.

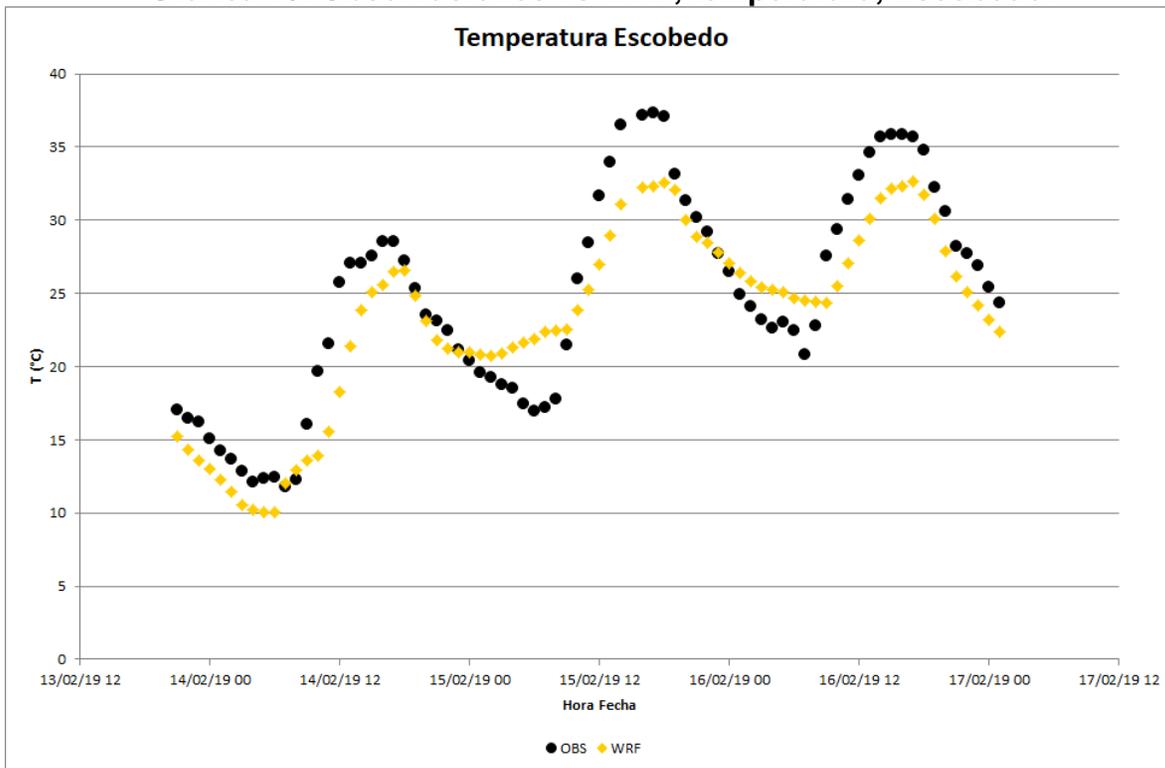
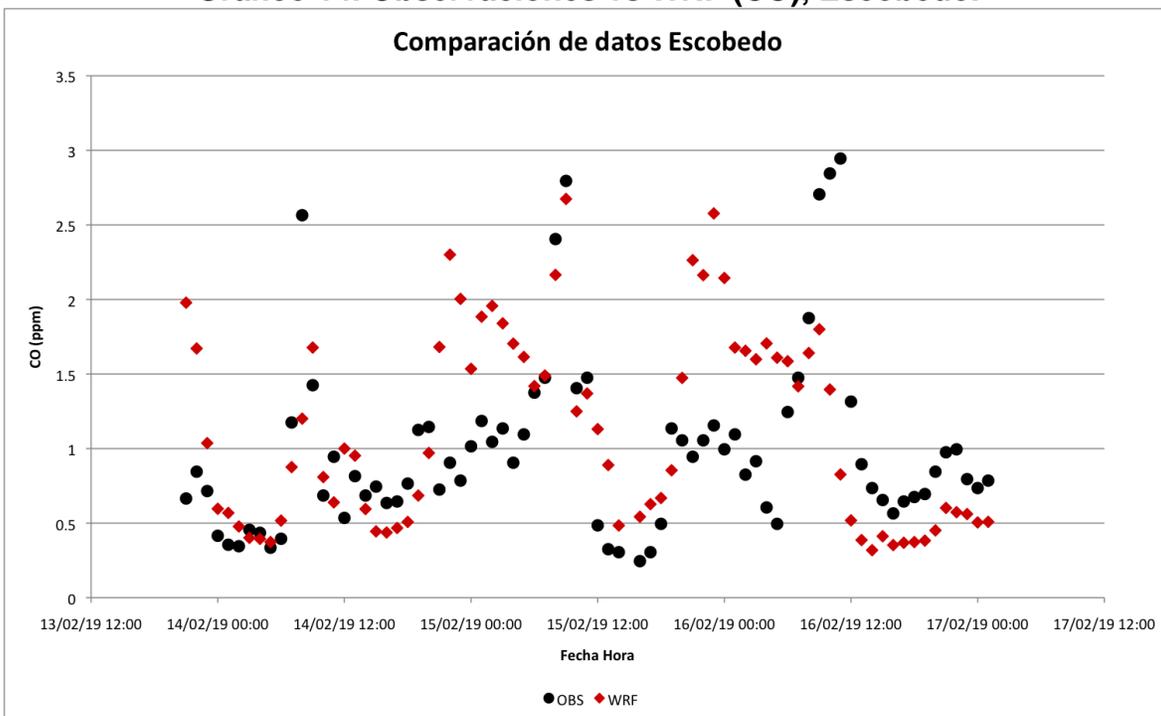


Gráfico 14. Observaciones vs WRF (CO), Escobedo.

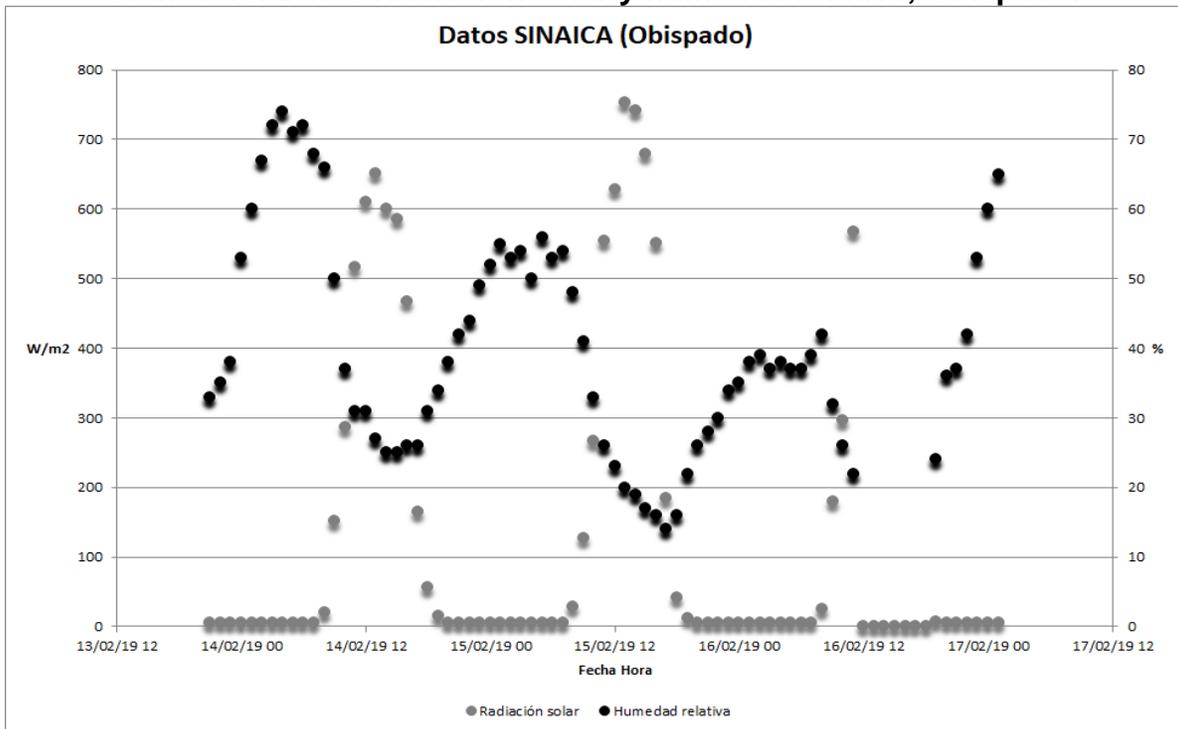


A diferencia de las otras estaciones para Escobedo, el comportamiento del modelo WRF-CHEM en el gráfico 14 es distinto al de Apodaca y Cadereyta porque algunos puntos se encuentran cerca de las observaciones sin embargo otros se encuentran muy dispersos, hay diferencias de magnitud entre estos de 1.5 ppm, pero la forma gráfica es parecida a los datos observados, habría que modificar las fuentes de fijas o móviles para llegar a tener una mejor relación del modelo con los datos observados.

En el gráfico 14, hay tres concentraciones máximas de monóxido de carbono mayores a 2 ppm, la primera es el día 14 a las 8:00 am a 12.25°C (gráfico 13), la segunda el día 15 a las 9:00 am a 21.47 °C y la tercera el día 16 a las 11:00 am a 31°C, estos tres eventos se presentan durante la mañana, con una humedad mayor al 30% (gráfico 12), hay que considerar que generalmente en estos horarios es cuando las personas comienzan sus actividades, en diferentes áreas como la industria, ganadería u otras, para llegar a sus destinos es necesario trasladarse en algún tipo de transporte público o privado, los cuales generan este tipo de contaminantes.

Estación: Obispado
Altura: 560 msnm Coordenadas geográficas: 25.68N, 100.34 O

Gráfico 15. Datos Radiación solar y humedad relativa, Obispado.



Gráfica 16. Observaciones vs WRF, temperatura, Obispado.

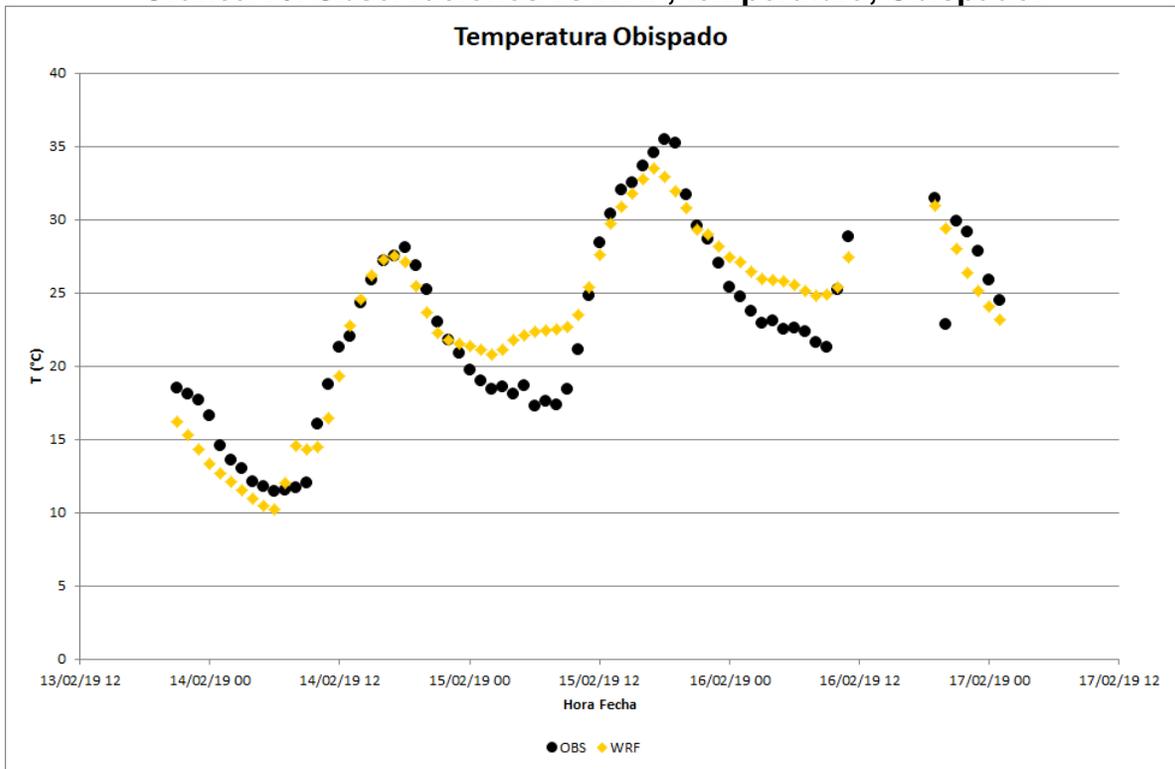


Gráfico 17. Observaciones vs WRF (O₃), Obispado.

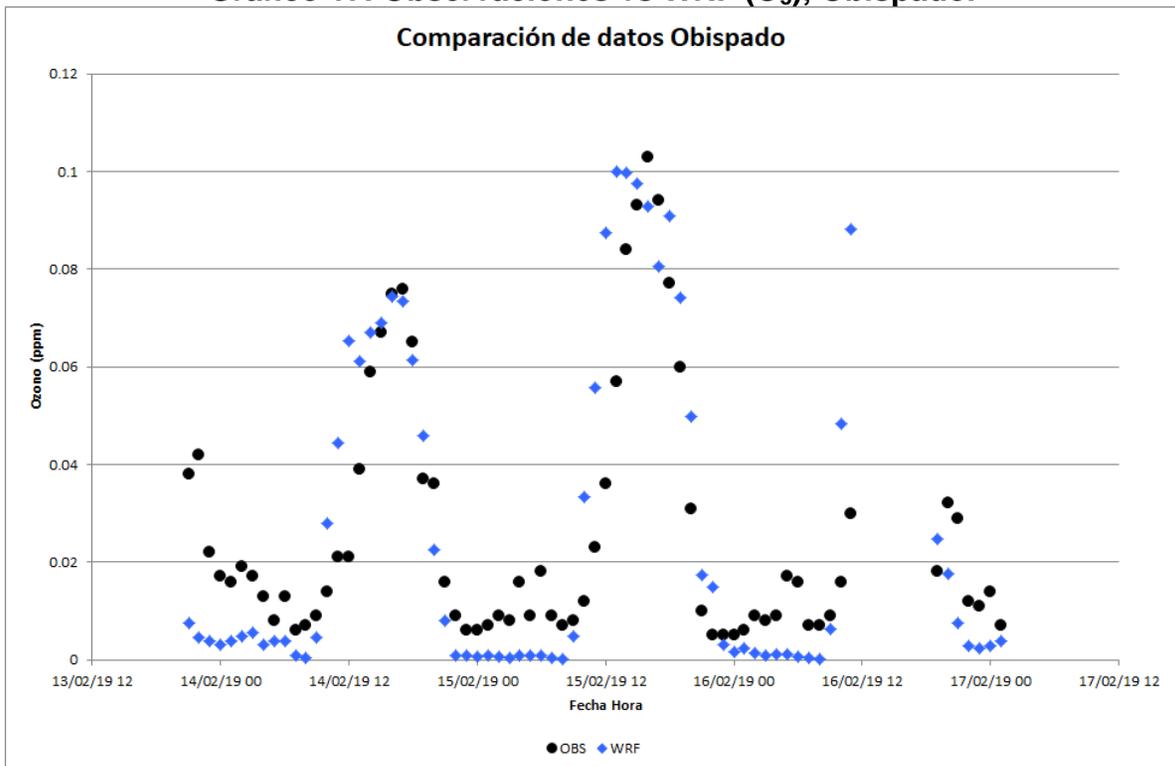
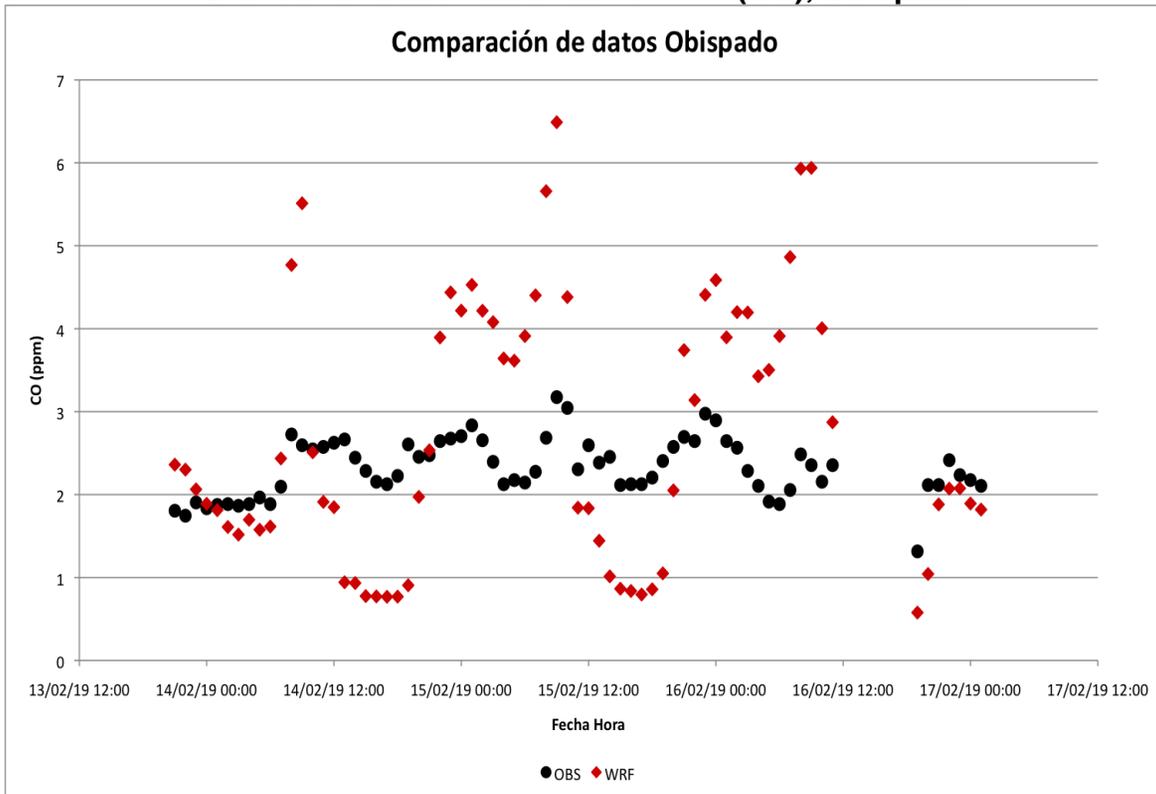


Gráfico 18. Observaciones vs WRF (CO), Obispado



Para Obispado, el modelo WRF-CHEM en comparación con las observaciones tiene una misma relación en cuanto a la forma y magnitud en la gráfica 16 y 17, sin embargo, hay días en los que no se registraron datos, los datos que se encuentran cerca de estos días presentan una diferencia significativa en cuanto a magnitud.

En el gráfico 18, a pesar de la desestacionalización de los datos observados se puede percibir que hay concentraciones mucho más altas esto se debe a las modificaciones al modelo como se había mencionado, sin embargo también hay concentraciones más bajas, la concentración mínima de CO en las observaciones está por arriba de 1 ppm, mientras que el modelo tiene concentraciones mínimas por debajo de 1 ppm, ya que el modelo toma de referencia la concentración de fondo global, probablemente esto se deba a la falta de mantenimiento de los equipos de monitoreo o a la concentración de fondo propia de la ciudad de Monterrey, habría que revisar los datos de otra estación que se encuentre cercana a Obispado. De acuerdo al anexo VII, la pendiente es positiva esto quiere decir que al modificar una de las variables en un sentido, la otra lo hace en la misma dirección, por ello al modificar alguna de las fuentes de emisión puede cambiar otra variable.

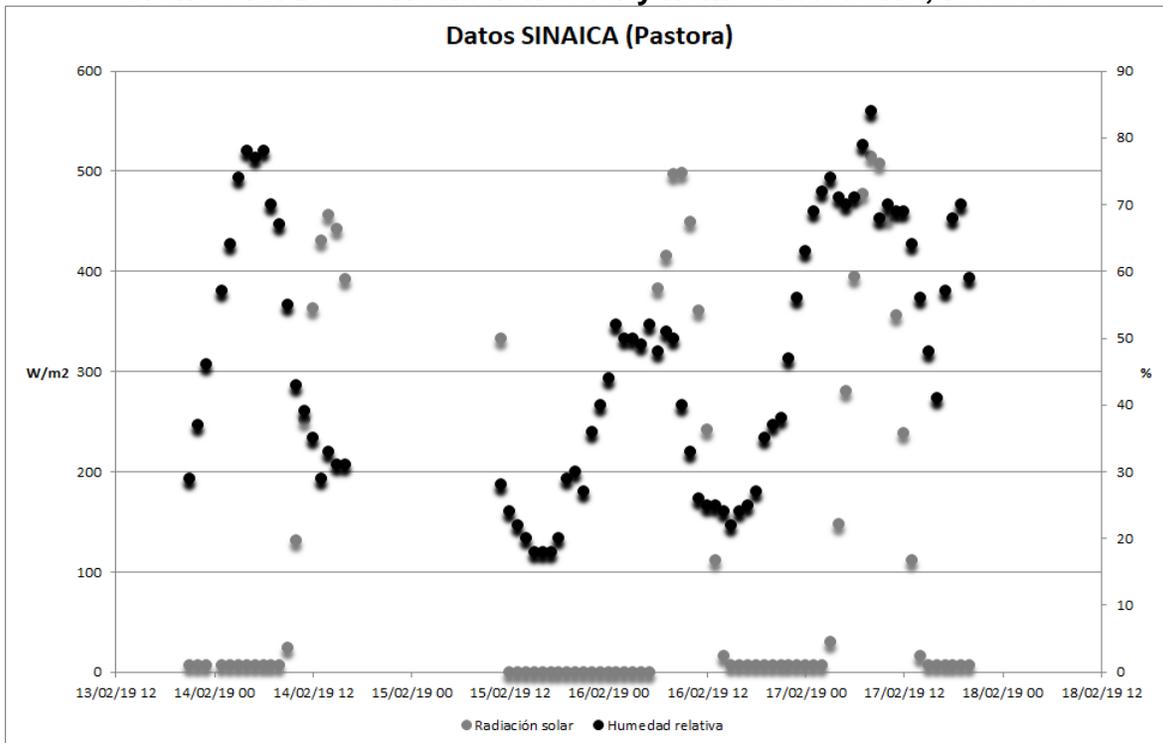
La concentración más alta de ozono (gráfico 17) es de 0.103 ppm, el viernes 15 de febrero a las 16:00 pm con una temperatura de 37.19°C (gráfico 16), una humedad del 16% y una radiación solar de 400 W/m² (gráfico 15), bajo estas condiciones se favorece la estacia de ozono en esta zona. Debido a que este contaminante es un producto secundario, emitido en gran medida por la acción humana, teniendo como precursores los NOx, COV'S, CO, etc., que provienen de grandes centros de combustión y tráfico.

El 17 de febrero a las 11:00 am se tiene una concentración de monóxido de carbono de 2.355 ppm (gráfico 18) a 31.4°C, una humedad del 30% y una radiación solar de 475 W/m² (gráfico 15).

La máxima concentración de monóxido de carbono se registro durante la mañana, a una temperatura donde las personas perciben el tiempo como caluroso por ello optan por utilizar el aire acondicionado de sus vehículos, este proceso requiere de consumo de energía que se traduce en un mayor gasto de combustible (gasolina o diesel) esto genera aún más productos de la combustión incompleta como es el CO.

Estación: Pastora
Altitud: 492 msnm Coordenadas geográficas: 25.67N, 100.25 O

Gráfico 19. Datos Radiación solar y humedad relativa, Pastora



Gráfica 20. Observaciones vs WRF, temperatura, Pastora

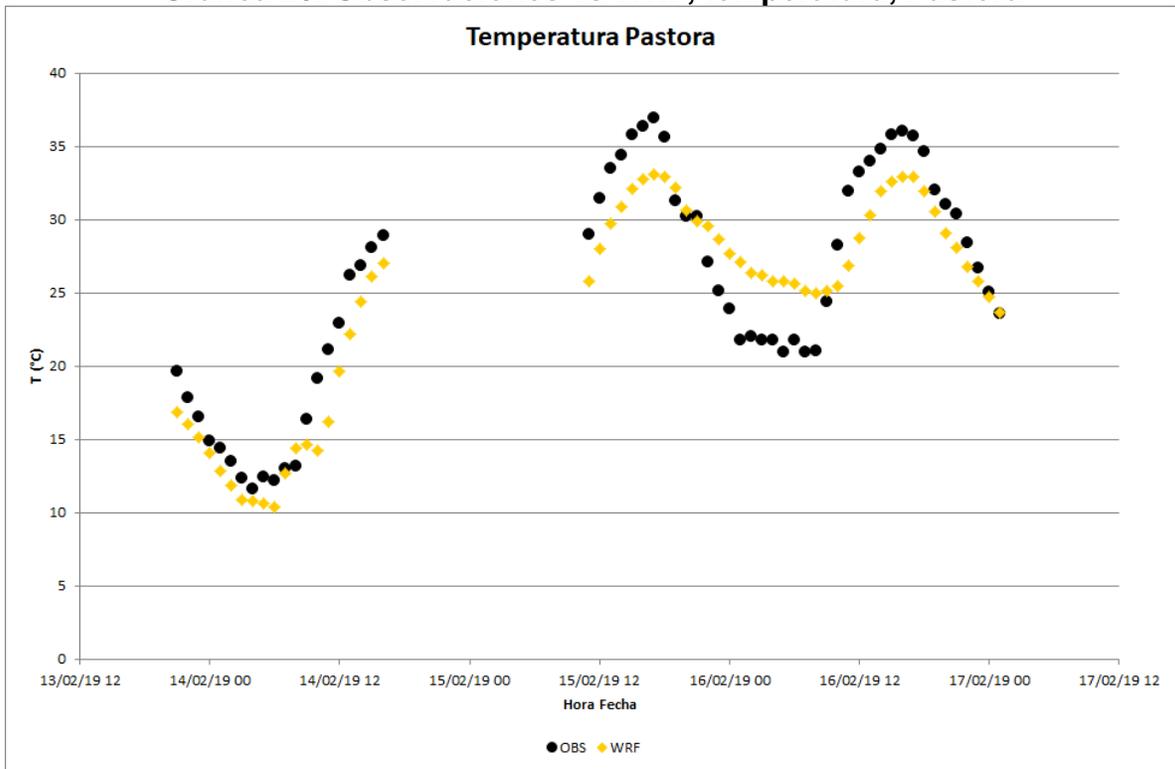


Gráfico 21. Observaciones vs WRF (O₃), Pastora

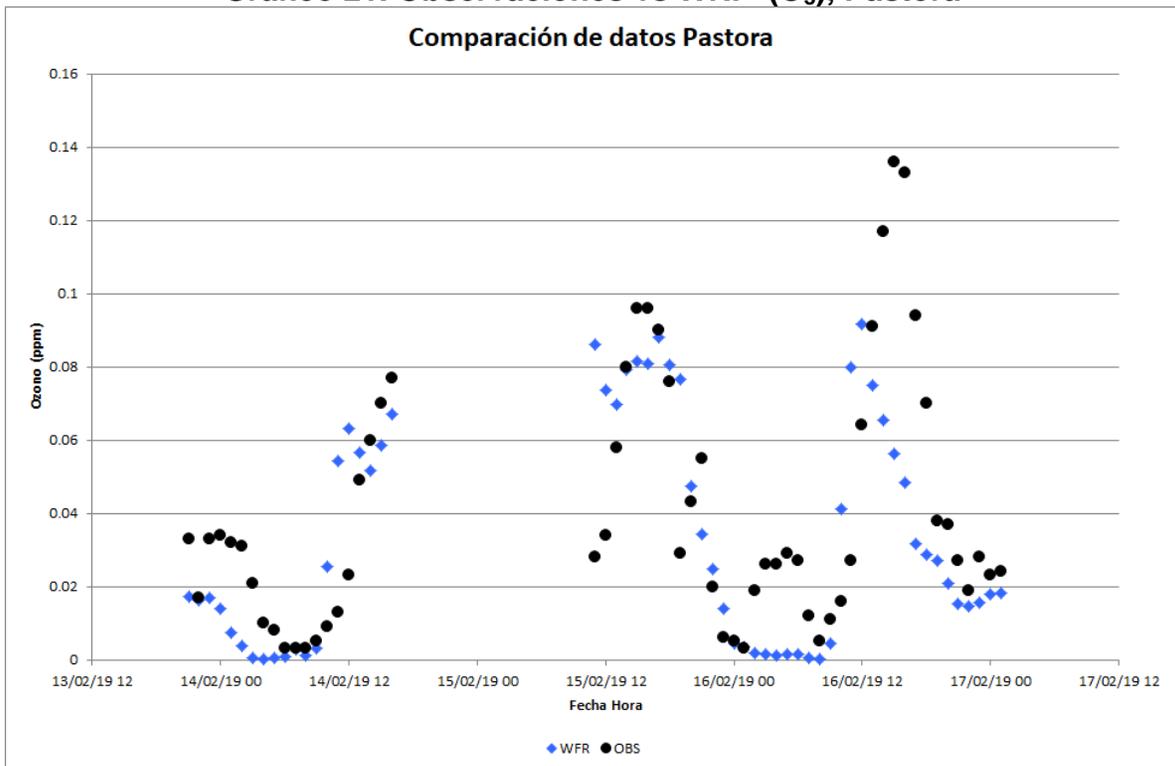
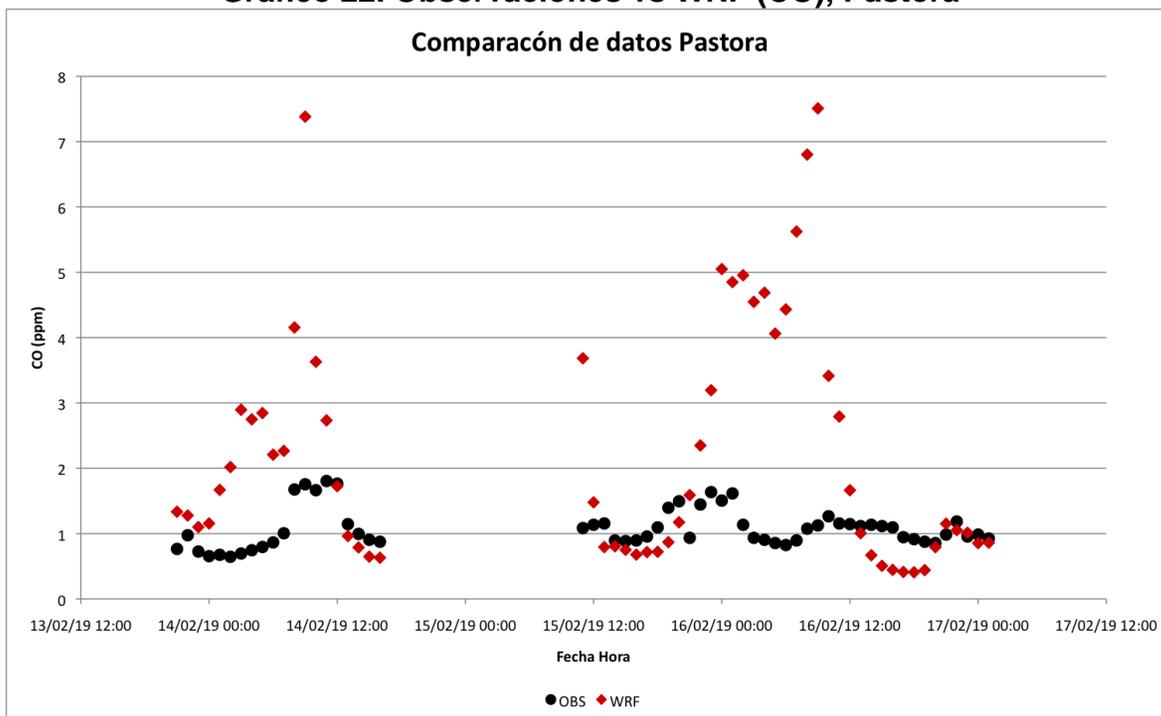


Gráfico 22. Observaciones vs WRF (CO), Pastora



En la página del SINAICA no se encuentra completo el inventario de emisiones para esta estación, los datos estaban incompletos del 14 al 15 de febrero a las 12h por esto hay espacios en blanco en las gráficas.

Para la temperatura (gráfico 20), los datos del modelo WRF-CHEM están agrupados dentro de los datos observados con unas pequeñas diferencias al igual que para el ozono (gráfico 21), si se aumentan las fuentes móviles para alcanzar la concentración máxima de las observaciones el modelo se estaría sobrado.

El CO (gráfico 22) del modelo WRF-CHEM presenta una diferencia de concentraciones considerable en comparación con las observaciones en las concentraciones mínimas el modelo se acopla a los datos observados, pero en las concentraciones máximas la diferencia entre ambos es de hasta 6 ppm, por lo tanto, el modelo está sobrado para Pastora, debido a las modificaciones en las diferentes fuentes de emisión que se hicieron para ajustarlo a las observaciones antes de percatarnos del error en los datos observados. Por otra parte Pastora es una estación que se encuentra cerca de Obispado, las concentraciones mínimas son menores a 1 ppm, lo cual indica que la concentración de fondo de Monterrey no es mayor a la concentración de fondo global.

En cuanto a la concentración de ozono, se puede ver en el gráfico 21 que el día 16 de febrero a las 15:00 se muestra un máximo con 0.136 ppm a 36.02°C, humedad relativa del 16% y radiación solar de 356 W/m² (gráfico 19), es hasta ahora una de las estaciones que presenta la mayor concentración de ozono reportado, esta concentración rebasa la NOM-020-SSA1-2014 en donde se establece que la

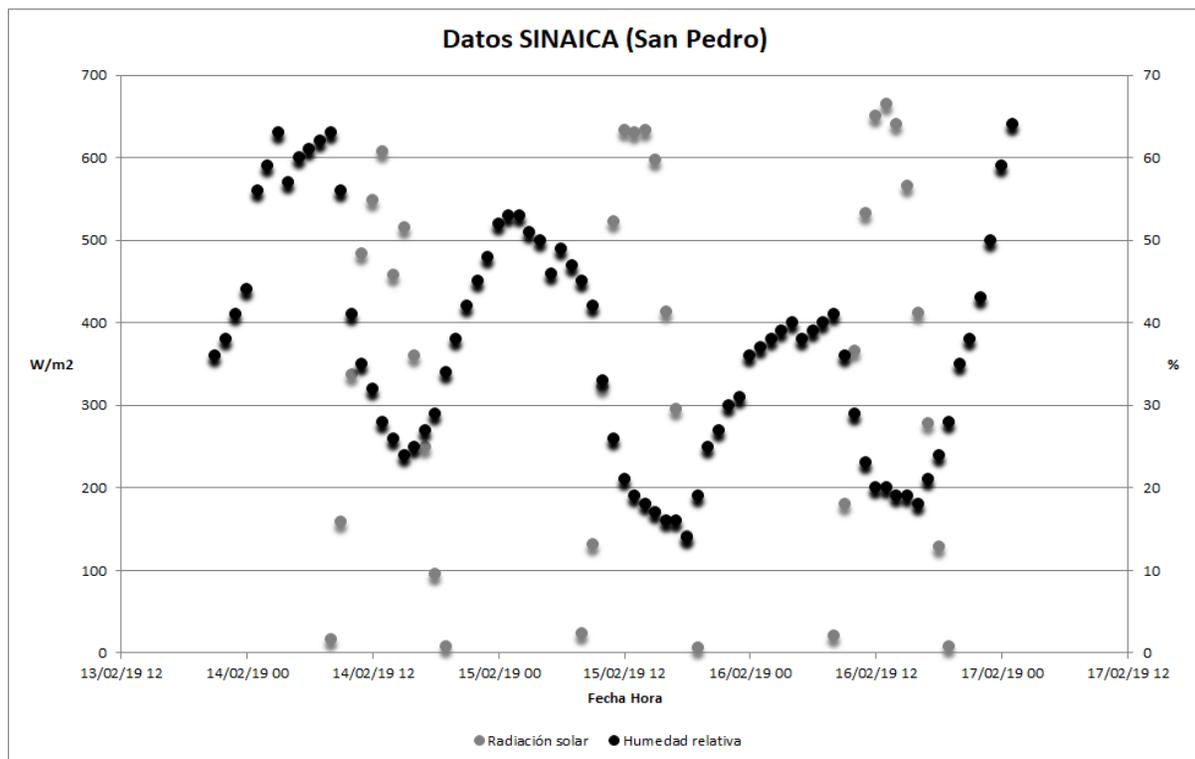
concentración máxima de exposición es de 0.095 ppm promedio móvil de 8 horas , es importante mencionar que Obispado también reportó a esta misma hora una alta concentración de ozono que rebasa la norma. Hay que recordar que los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el monóxido de carbono (CO) son producto de la combustión incompleta de combustibles fósiles y precursores del O_3 .

Para monóxido de carbono (CO) el 14 de febrero a las 11:00 se tiene una concentración de 1.95 ppm a $21.1\text{ }^\circ\text{C}$ con una humedad relativa del 39% y una radiación solar de 363 W/m^2 (gráfico 19), la mayoría de las estaciones analizadas hasta el momento presentan una mayor concentración de CO durante la mañana con poca humedad y una radiación considerable, bajo estas condiciones se favorecen las reacciones que dan como producto el CO.

Estación: San Pedro

Altitud: 636 msnm Coordenadas geográficas: 25.67N, 100.41 O

Gráfico 23. Datos Radiación solar y humedad relativa, San Pedro



Gráfica 24. Observaciones vs WRF, temperatura, San Pedro

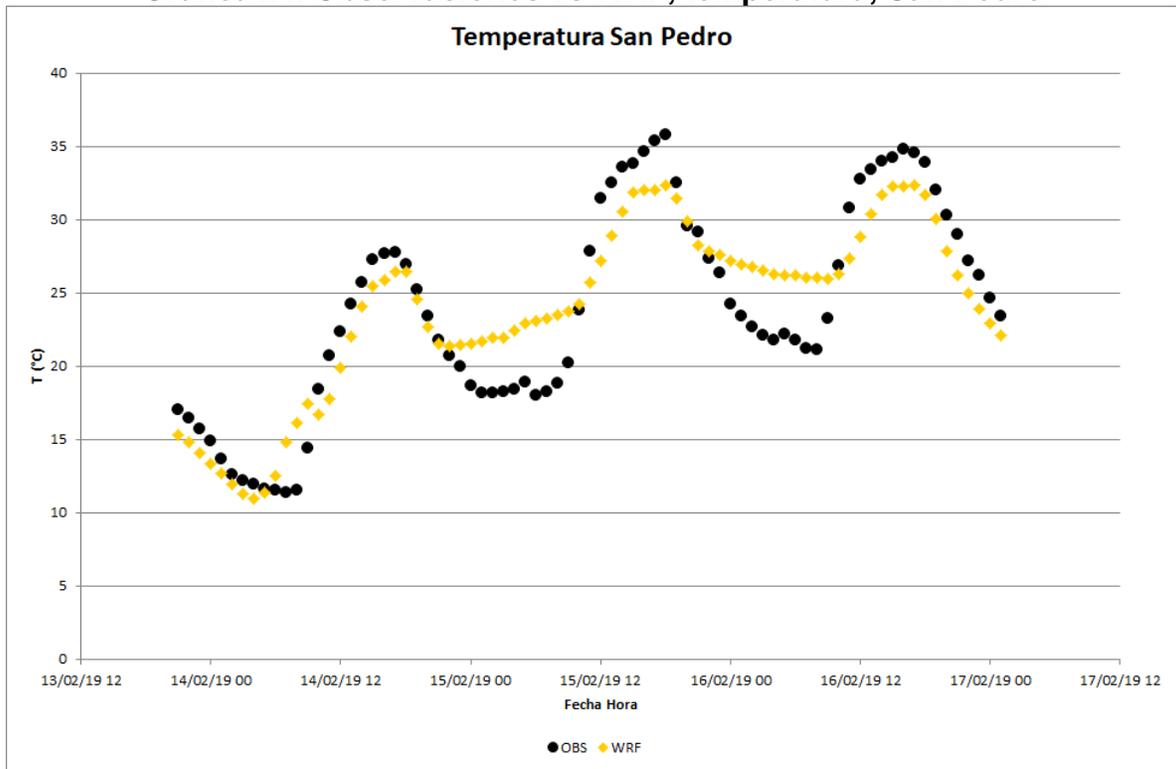


Gráfico 25. Observaciones vs WRF (O₃), San Pedro.

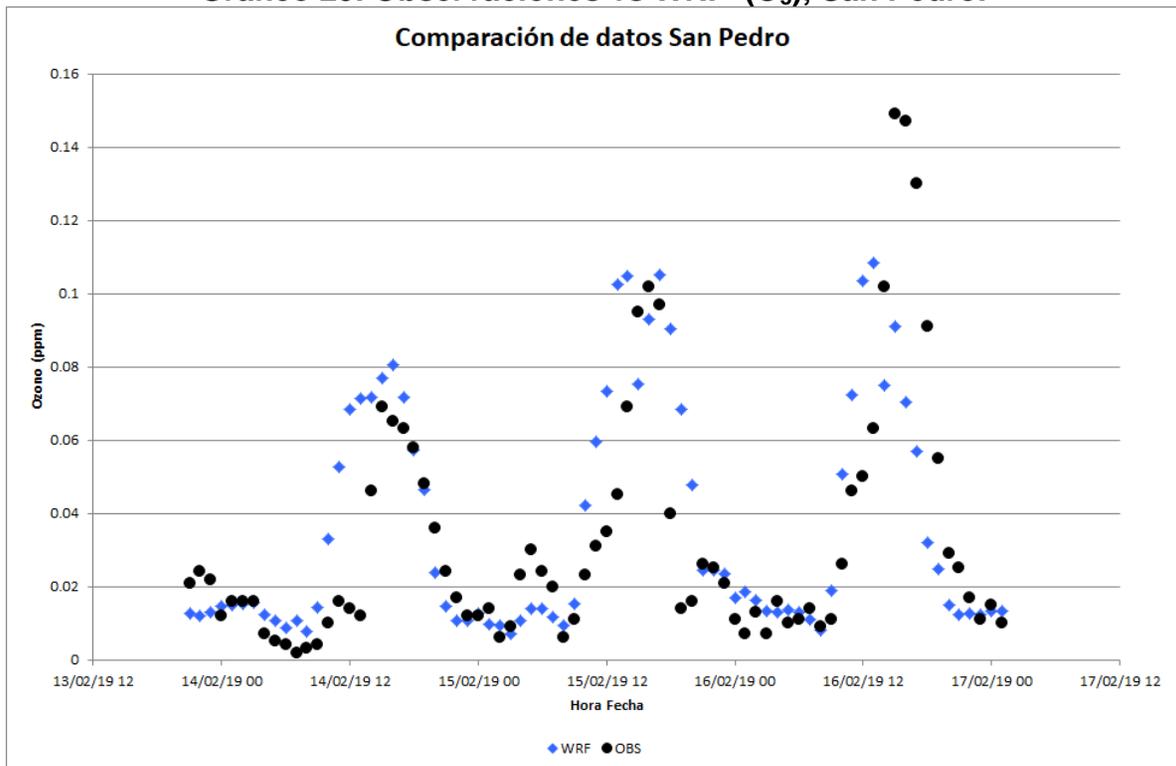
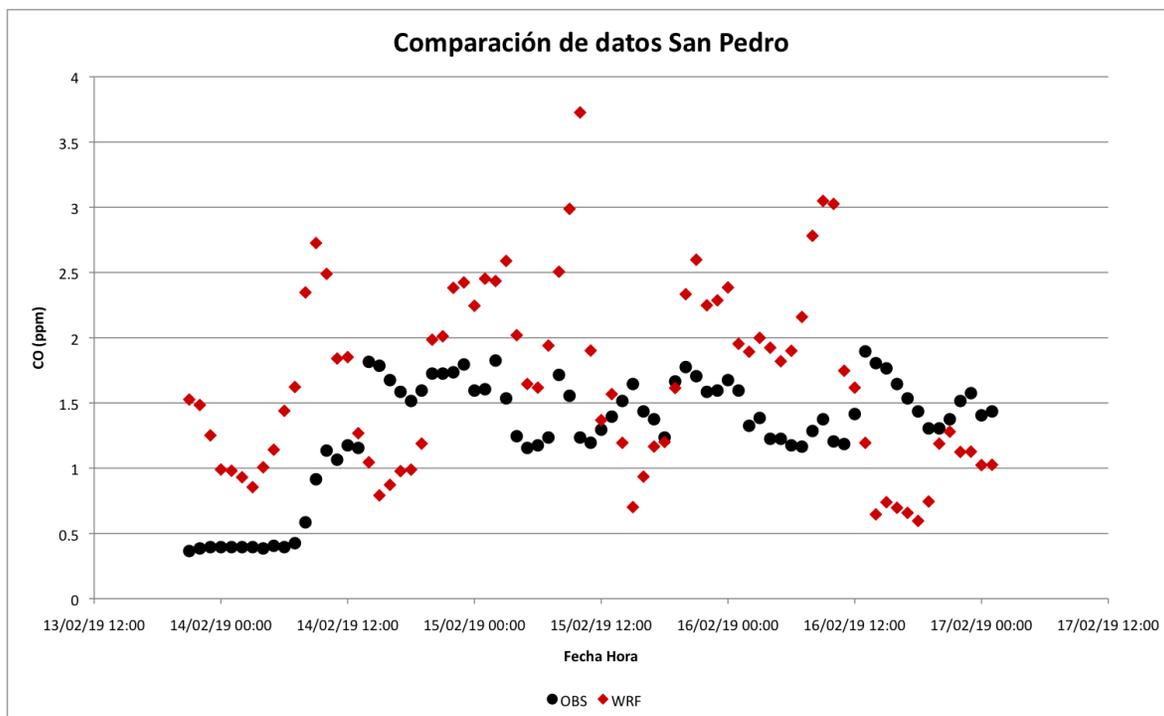


Gráfico 26. Observaciones vs WRF (CO), San Pedro



El modelo WRF-CHEM en el gráfico 24, para temperaturas altas el modelo tiene una fuerte relación con los datos observados y en las temperaturas mínimas se presenta una diferencia significativa de magnitud.

El ozono (gráfica 25) del modelo WRF-CHEM, muestra concentraciones similares a las concentraciones de los datos observados en los primeros dos picos y una concentración más alta en el último pico, tal vez no son las fuentes móviles lo que afecta directamente al modelo si no que otro evento de quema de combustibles fósiles que no toma en cuenta el modelo al momento de realizar la simulación, por ejemplo, un incendio.

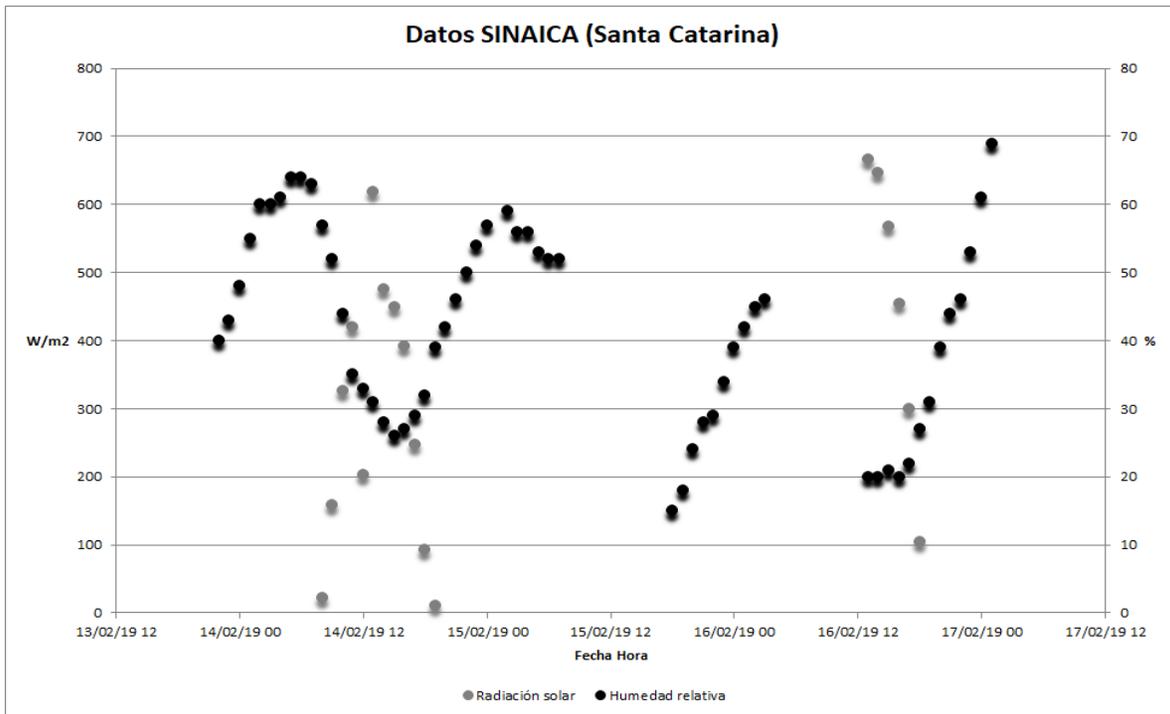
El monóxido de carbono (CO) de acuerdo al gráfico 26, presenta poca o nula relación con los datos observados, por ejemplo el 15 de febrero a las 11 la concentración máxima del modelo es de 3.75 ppm, mientras que, los datos observados tienen una concentración menor a 1.5 en ese mismo día y hora, además los datos se encuentran dispersos.

Podemos observar en el gráfico 25 que el 16 de febrero a las 15:00 pm se reporta una concentración de ozono (O_3) de 0.149 ppm (rebasa la NOM-020-SSA1-2014) a $34.8^\circ C$, con una humedad relativa de 18% y una radiación solar de $412 W/m^2$ (gráfico 23), este día, a la misma hora Pastora y Obispado reportan una concentración máxima, por arriba de la norma, esto se debe probablemente a que son estaciones que se encuentran relativamente cerca entre sí, en la ZMM.

El monóxido de carbono para San Pedro a partir del día 14 de febrero a las 12 h permanece por arriba de 1 ppm, la concentración máxima es de 0.98 ppm el día 16 de febrero a las 13:00 pm a $32.47^\circ C$ y una radiación solar de $630 W/m^2$, bajo estas condiciones y recordando que el CO es producto de la combustión incompleta de combustibles, el origen puede ser el tráfico vehicular, el aire acondicionado de los automóviles y casas o algún tipo de industria que requiera quemar combustibles para generar energía.

Estación: Santa Catarina
Altitud: 694 msnm Coordenadas geográficas: 25.68N, 100.46 O

Gráfico 27. Datos Radiación solar y humedad relativa, Santa Catarina



Gráfica 28. Observaciones vs WRF, temperatura, Santa Catarina

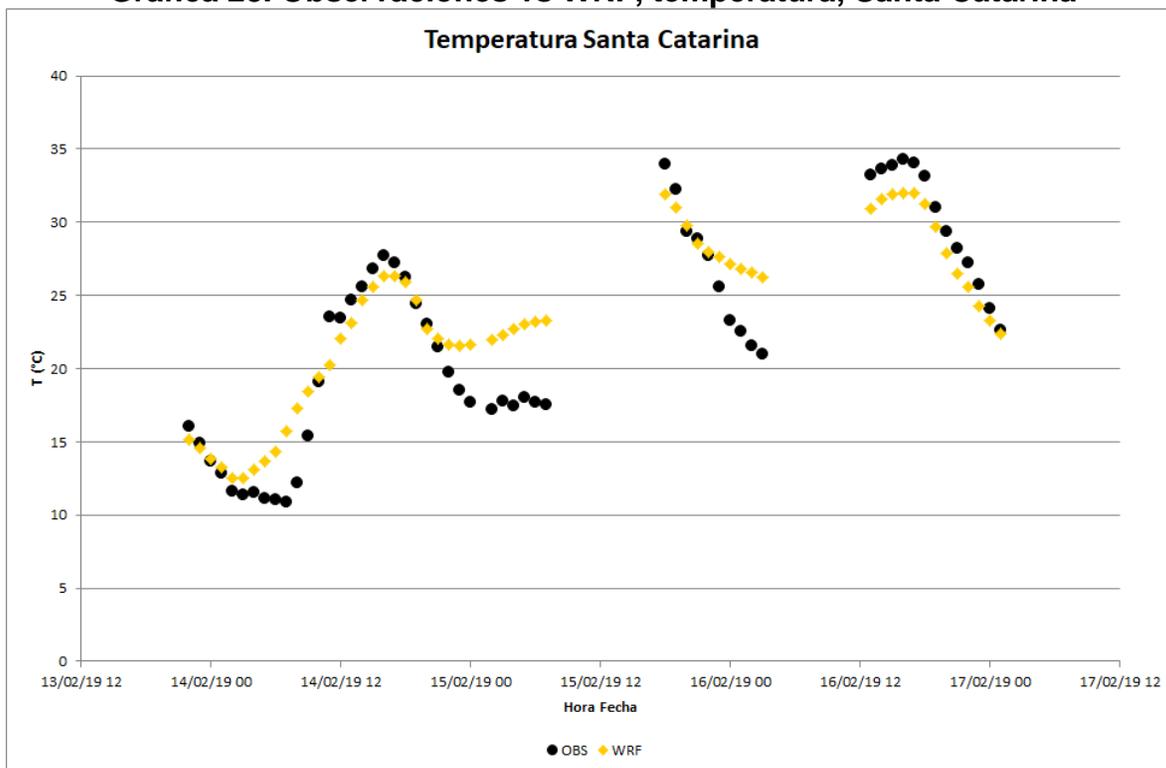


Gráfico 29. Observaciones vs WRF (O₃), Santa Catarina

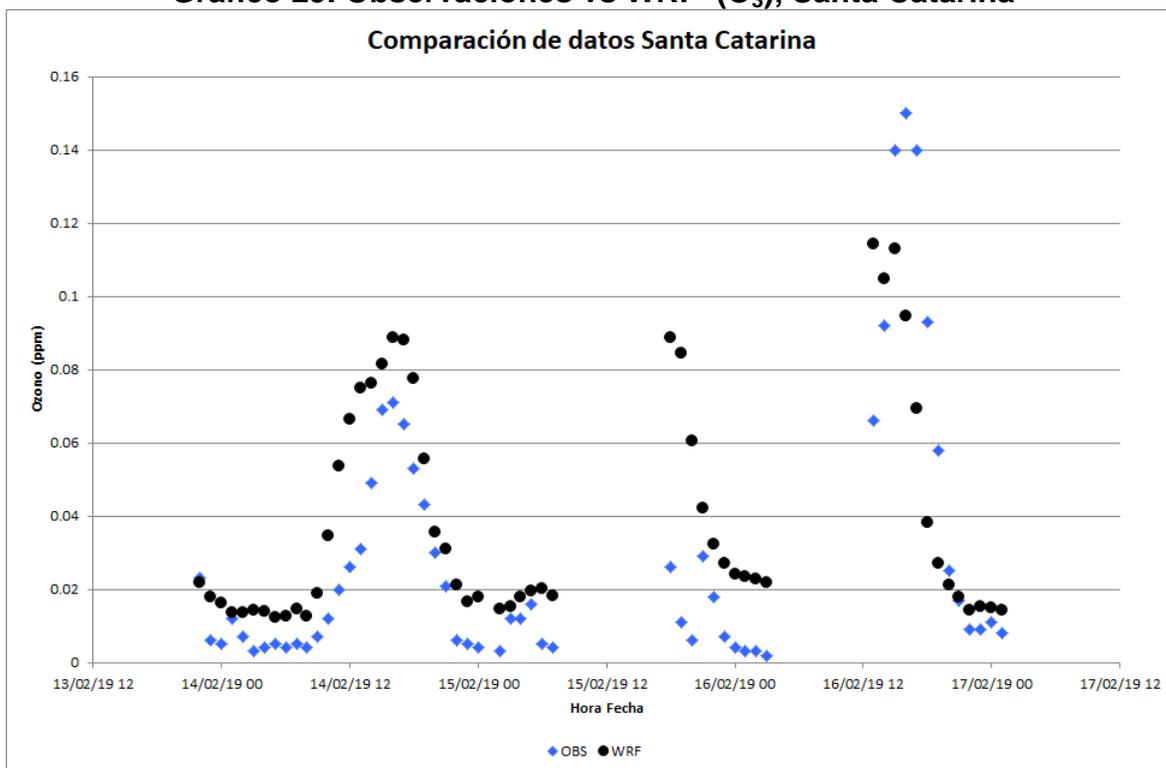
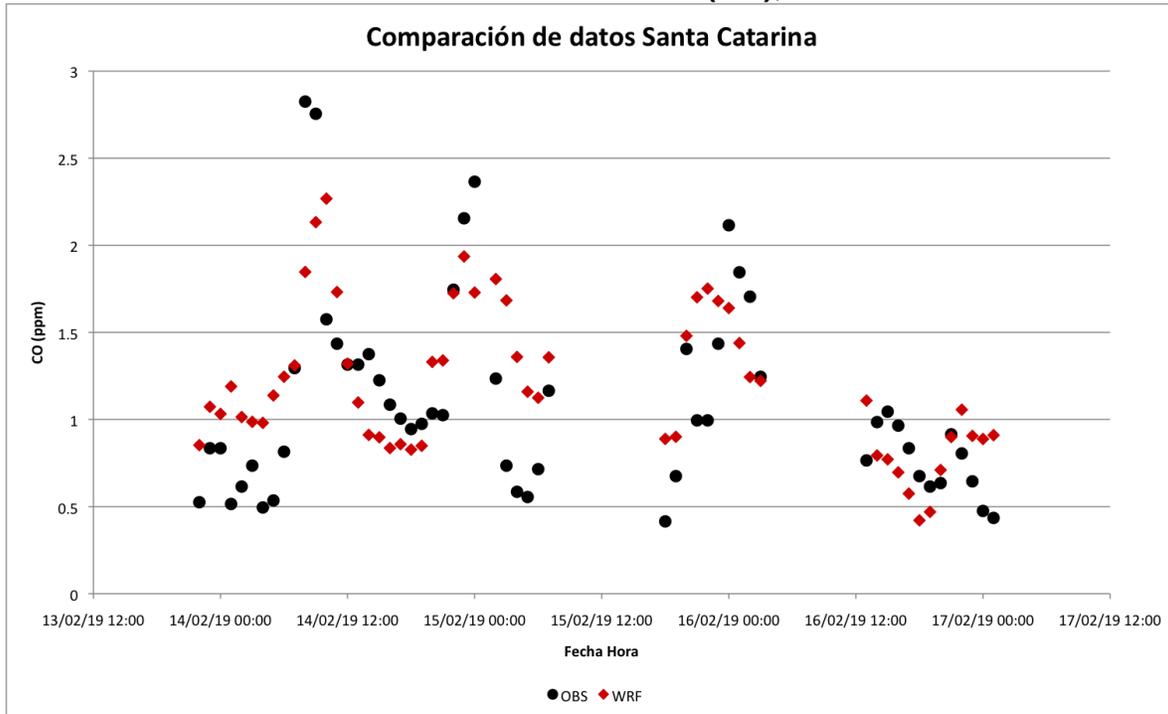


Gráfico 30. Observaciones vs WRF (CO), Santa Catarina



En la gráfica 28 los datos que se encuentran cerca de los espacios en blanco (datos faltantes) presentan una mayor diferencia en cuanto a magnitud entre los datos observados y el modelo para la temperatura en Santa Catarina.

El modelo WRF-CHEM del ozono (gráfico 29) tiene una fuerte relación con los datos observados, sin embargo hay una diferencia significativa en el último pico, para la cual el modelo se para el segundo pico se muestra sobrado y para el último faltante.

El monóxido de carbono (gráfico 30) presenta una buena relación de los datos observados, aunque los datos se perciben un poco dispersos un número importante se encuentra cerca del valor de los datos observados es la estación que presenta una mejor correlación como se había mencionado anteriormente.

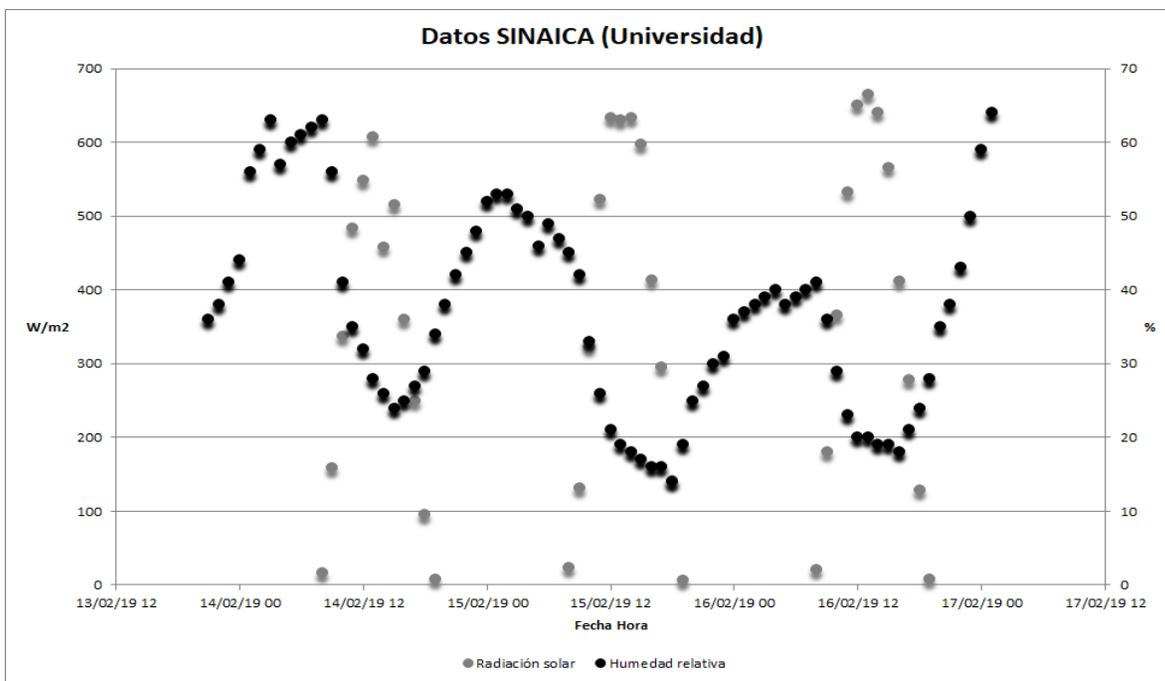
El ozono (gráfica 29), el 16 de febrero a las 16:00 pm tiene una máxima concentración de 0.150 ppm a 34.27°C esta es una concentración similar a la de San Pedro, era de esperarse por la cercanía de estas estaciones, con una humedad relativa del 20% y radiación solar de 455 W/m² (gráfico 27) condiciones meteorológicas que favorecen sin duda la formación del ozono como hemos observado en las estaciones anteriores ya que a una humedad relativa baja, radiación solar y temperatura alta se favorecen las reacciones que dan como producto secundario al ozono.

El monóxido de carbono (gráfico 30), a las 8:00 am, hora en que inician las actividades en la ZMM, esto puede originar tráfico vehicular, por ello el día 14 de febrero a 12.21°C se percibe la concentración más alta de todas las estaciones de 2.825 ppm, aunque es la más alta para este periodo de análisis, está dentro de los límites máximos permisibles, ya que, de acuerdo a la NOM-021-SSA1-1993 el monóxido de carbono como contaminante atmosférico no debe rebasar las 11 ppm en un promedio móvil de 8 horas.

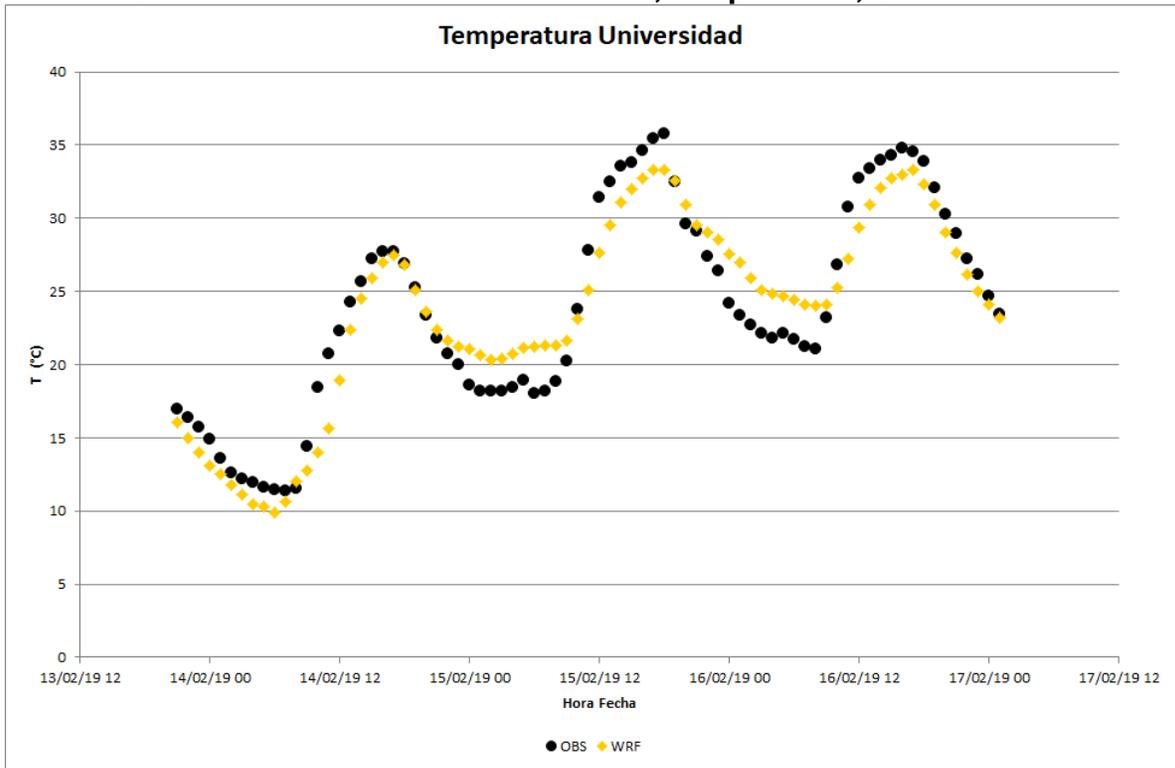
Las condiciones meteorológicas de la concentración máxima de monóxido de carbono se dan durante la mañana y temperatura baja, con una radiación solar de 22 W/m² y una humedad de 57% (gráfico 27), condiciones que favorecen el aumento en la concentración de monóxido de carbono para esta zona.

Estación: Universidad
Altitud: 517 msnm Coordenadas geográficas: 25.73 N, 100.31 O

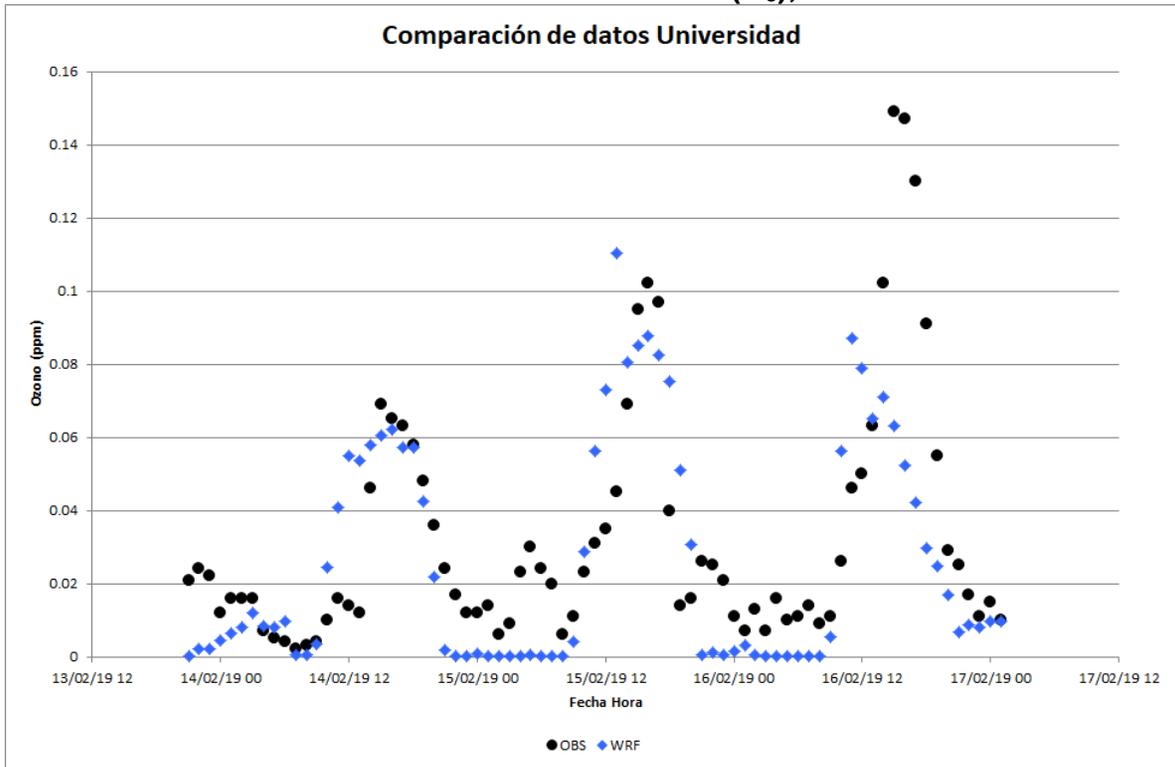
Gráfico 31. Datos Radiación solar y humedad relativa, Universidad



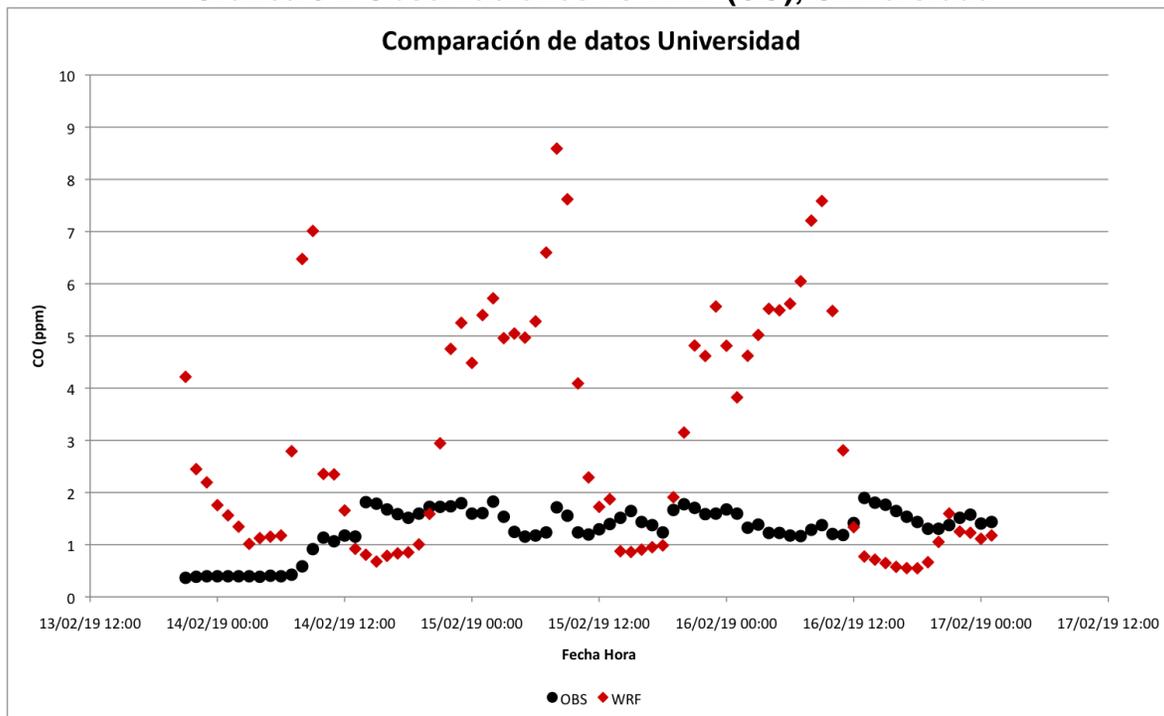
Gráfica 32. Observaciones vs WRF, temperatura, Universidad



Gráfica 33. Observaciones vs WRF (O₃), Universidad



Gráfica 34. Observaciones vs WRF (CO), Universidad



El comportamiento del modelo WRF-CHEM en Universidad para cada una de las gráficas es diferente, puesto que para la temperatura (gráfica 32) hay una muy buena relación entre los datos observados y el modelo.

Para el ozono en la gráfica 33, aunque hay una buena relación de los datos en la mayoría de las concentraciones, en las concentraciones bajas, además en la concentración más alta de ozono no alcanza la concentración de las observaciones.

El monóxido de carbono en el gráfico 34, el modelo no sigue el comportamiento de los datos observados, ya que tiene picos que sobrepasan las concentraciones altas de los datos observados o datos que se quedan muy por debajo de estos.

En la gráfica 33 se visualiza una concentración máxima de 0.149 ppm de ozono, el 16 de febrero a las 15:00 a 34.26°C, con una humedad de 18% y una radiación de 412 W/m², misma concentración que ya había sido reportada para este horario y fecha por otras dos estaciones: San Pedro y Santa Catarina.

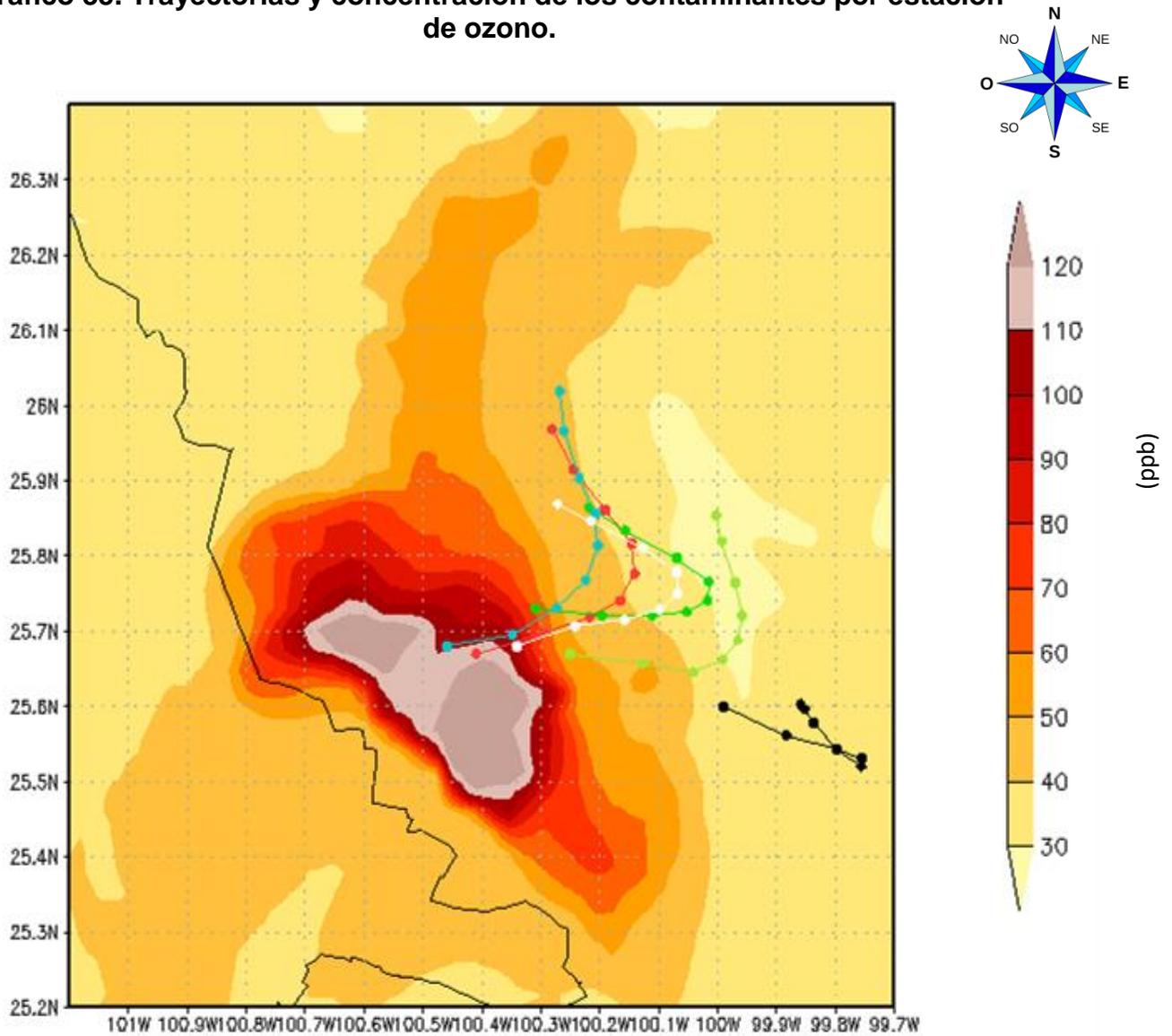
El monóxido de carbono se mantiene en más de 3000 ppb o 3 ppm, durante el periodo analizado con una concentración máxima de 4720 ppb o 4.72 ppm, el 16 de febrero a las 13:00 al igual que San Pedro, esto se debe a la proximidad de las estaciones y a la dirección del viento que analizaremos en las trayectorias.

4.4 Trayectorias

4.4.1 Origen de los contaminantes de Monterrey

Debido a la inestabilidad de los datos de monóxido de carbono (CO) en comparación con los datos observados, se optó por obtener las trayectorias para el ozono ya que presenta mejores resultados tomando en cuenta la aproximación y relación del modelo con los datos observados.

Gráfico 35. Trayectorias y concentración de los contaminantes por estación de ozono.



● Cadereyta ● Pastora ● Universidad ● Obispo ● San Pedro ● Santa Catarina

En el gráfico 35 se observa la concentración de ozono de acuerdo a la zona geográfica en la que se encuentra, donde 30 es la menor concentración y 120 una alta concentración de ozono.

La mayor acumulación de ozono se percibe en los límites de Saltillo y parte del centro de Monterrey, si se observa y compara el gráfico 35 con la imagen 1 se puede percatar que la mayor parte de la concentración de ozono en Monterrey se encuentra en la zona montañosa esto es porque las montañas son una barrera para el viento, impidiendo que las parcelas de aire se distribuyan y por ende que la concentración de ozono aumente en esa zona. También se puede ver rápidamente que San Pedro, Santa Catarina y Obispedo son las que presentan una concentración arriba de 100 ppb mientras que a Cadereyta por estar alejada de la zona montañosa tiende a presentar menor acumulación de ozono.

Es importante revisar la dirección de las corrientes de aire, en el anexo XII la rosa de los vientos de Cadereyta indica que el viento proviene del noroeste con una velocidad de 3.5 m/s, para Pastora del noreste a más de 7.9 m/s, para Universidad del este a 7.9 m/s aprox., para Obispedo del noreste a 7.9 m/s, para San Pedro del este a 7.9 m/s y para Santa Catarina del norte a 7.9 m/s. En mayoría de las estaciones el registro indica que las parcelas de aire provienen del noroeste, este o noroeste, provienen de direcciones contrarias, aunado a las condiciones geográficas de Monterrey el ozono choca con las montañas y parte de este se acumula en esa zona, la velocidad del viento del 14 al 16 de febrero es intensa por lo cual habría ver hacia dónde se dirigen estas corrientes de aire y si pueden afectar a Saltillo debido a su cercanía.

Trayectorias por estación

Se pueden observar las trayectorias de monóxido de carbono y ozono para cada una de las estaciones en el anexo XI, para una mejor ubicación de las mismas en Google Earth se representan con líneas de colores y los puntos entre ellas representan las horas hacia atrás de la concentración máxima. Se debe regresar horas atrás para conocer el origen de las emisiones, a continuación se muestran las imágenes que se lograron capturar con la ayuda de Google Earth del origen del ozono (O_3) y monóxido de carbono (CO) en Monterrey.

Universidad

La trayectoria de los contaminantes de la estación universidad en la imagen 4, está representada de color aguamarina, indica que las emisiones provienen del autódromo de Monterrey, el cual se encuentra ubicado en la carretera Monterrey-Laredo km. 23, Apodaca., cuenta con dos circuitos, el circuito del gran premio con una longitud de 3.4 km y el frijol con una longitud de 1.6 km, se encuentra abierto de Martes a Domingo. También cerca de ahí se encuentra el aeropuerto internacional del norte, el cual está en constante actividad y puede contribuir con la generación de emisiones.

Imagen 4. Origen de los contaminantes, Universidad.

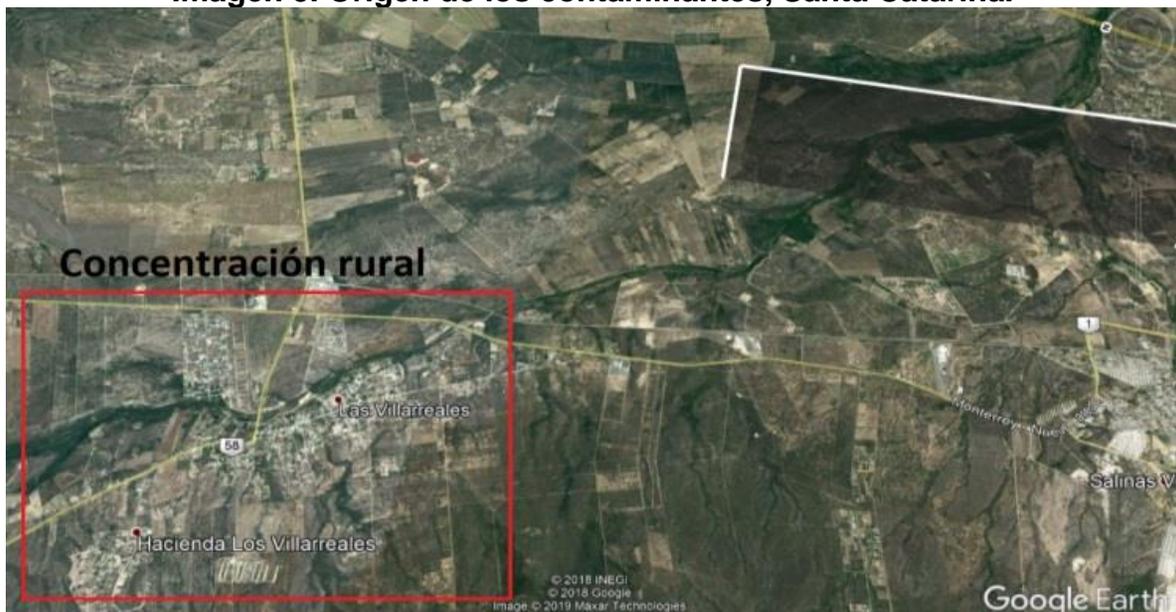


Fuente: Google Earth.

Debido a que la mayor concentración de contaminantes se registra el día viernes 16 de febrero, un evento de gran relevancia en el autódromo pudo ser el causante de la generación de contaminantes producto de los eventos que se realizan en el autódromo o del tráfico generado por los asistentes a tal evento.

Santa Catarina

Imagen 5. Origen de los contaminantes, Santa Catarina.



Fuente: Google Earth.

La trayectoria de esta estación es color blanco en la imagen 5, las emisiones provienen cerca de los Villarreales, localidad situada en el Municipio de Salinas Victoria, es una población pequeña con 811 habitantes. Es poco probable que el tráfico automovilístico influyera para obtener concentraciones de ozono de 150 ppb como se había analizado anteriormente.

Los Villarreales es una población pequeña donde sus habitantes se dedican a la agronomía. Febrero, es un mes seco, con 0% de precipitaciones y temperaturas por arriba de los 30°C. Por ello, un evento, como un incendio, pudo influir en la generación de contaminantes.

San Pedro

Imagen 6. Origen de los contaminantes, San Pedro.



Fuente: Google Earth.

Esta trayectoria está representada de color rojo en la imagen 6, a las 8:00 am se localizaron 3 posibles fuentes de emisión de contaminantes, la primera proviene de Salinas Victoria, municipio de Nuevo León con una población de 32625 (INEGI, 2010), el tipo de suelo es salitroso, causado por fuentes naturales como un clima árido y escasez de lluvia o antrópicas como el manejo incorrecto de técnicas agrícolas.

Se observa que la salida más próxima a la carretera principal Nuevo Laredo-Monterrey con dirección al centro de la ZMM es la calle Gregorio Morales (línea de color anaranjado), se considera que se generan emisiones producto de un cuello de botella de automóviles causado por los habitantes de la zona habitacional y los

que vienen de la comunidad de Salinas Victoria (cuadros de color azul), ya que durante la mañana los habitantes de este lugar van a trabajar o a realizar algún otro tipo de actividades.

En la imagen 6 de color café se visualiza una ruta y estación de ferrocarriles que se encargan del transporte de mercancías, los motores de los ferrocarriles utilizan algún tipo de combustibles fósiles para proporcionar energía a generadores o alternadores conectados a rectificadores de estado sólido que mueven motores eléctricos conectados a los ejes.

La tercera fuente de emisiones puede ser la industria pequeña que se percibe en el círculo amarillo, no se sabe con certeza qué tipo de industria es, solo se ven algunos tanques de almacenamiento.

Obispado

Imagen 7. Origen de los contaminantes, Obispado.



Fuente: Google Earth.

El color de la trayectoria de en la imagen 7 para Obispado es de color morado, anteriormente analizamos que a las 16:00 pm hay una concentración máxima de O_3 , si recorremos 8 horas hacia atrás encontramos que a las 8:00 am se generan emisiones de cuatro fuentes que se visualizan en la imagen 7, son un conjunto de complejos habitacionales, de color blanco se muestran las carreteras cercanas a estas zonas, los cuatro fraccionamientos que tienen una salida en común que lleva a la carretera Salinas Victoria, estas emisiones pueden ser producto del tráfico matutino.

Apodaca

Imagen 8. Origen de los contaminantes, Apodaca.



Fuente: Google Earth.

La trayectoria para esta estación se muestra de color azul en la imagen 8, si seguimos la ruta nos lleva a que las emisiones provienen de un lugar donde hay terrenos que probablemente son usados para la agricultura, pero si observamos más detalladamente los cuadros de color rojo muestran que estas emisiones pueden ser producto de las actividades que se llevan a cabo en una planta automotriz de gran importancia para la industria mexicana, la cual cuenta con 500 hectáreas y se dedica al ensamblaje, pintar y estampar automóviles, lo cual genera principalmente material particulado.

En la imagen 9 se puede ver una termoeléctrica, la cual es una instalación generadora de la energía liberada por combustibles fósiles, los tipos de contaminantes que genera la termoeléctrica dependen del tipo de combustible que se utiliza, las principales emisiones de este sistema son material particulado (PM_{10}), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x) precursores del O_3 .

Imagen 9. Origen de los contaminantes (termoeléctrica), Apodaca.



Fuente: Google Earth.

Todas estas emisiones son producto de la combustión incompleta de combustibles fósiles que manejan las empresas antes mencionadas como fuente de energía, en el caso de la termoeléctrica usan chimeneas altas para disminuir la contaminación pero con la acción del viento provoca el transporte de contaminantes a largas distancias, afectando otras zonas e incluso países.

Pastora

Imagen 10. Origen de los contaminantes, Pastora.



Fuente: Google Earth.

De color verde claro se encuentra la trayectoria de la estación Pastora, a las 6:00 am las emisiones una fuente de estas emisiones puede ser generada en la carretera de color amarillo que se muestra en la imagen 10 la cual es la salida más próxima a la Zona Metropolitana de Monterrey, ya que las emisiones de ozono se dan a las 6:00 am esto puede ser producto del tráfico causado por la salida de los habitantes de Marin (área de color rojo) a sus respectivas actividades.

Imagen 11. Zona industrial, Pastora



Fuente: Google Earth.

Debido a que Marin es una población chica de 3 075 habitantes y se encuentra 41.3 km de la ZMM probablemente no se genera mucho tráfico, por ello dos horas después a las 8:00 am en la imagen 11, la trayectoria muestra un área industrial, la cual representa una fuente importante de emisiones debido a la cantidad de combustibles fósiles que se queman para producir energía.

Cadereyta

La concentración máxima de ozono reportada para Cadereyta es de 93 ppm y de acuerdo a la NOM-020-SAA1-2014, no se permite un máximo de 95 ppm, por lo tanto cumple con la norma.

Imagen 12. Origen de los contaminantes, Cadereyta.



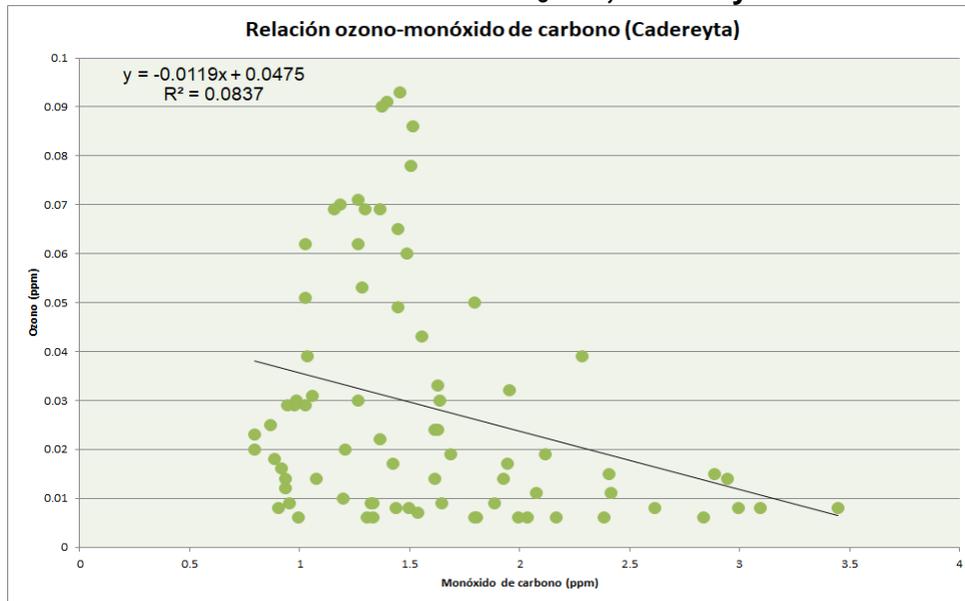
Fuente: Google Earth.

La trayectoria para Cadereyta se representa de color rosa en la imagen 12, se percibe que las emisiones a las 7:00 am provienen de un lugar donde hay terrenos de cultivo y un río, pero cerca de Cadereyta se encuentra una refinería, en sus instalaciones se lleva a cabo la producción de gasolina, diésel, propileno, gas LP, azufre, coque, entre otros petrolíferos, hay que recordar que la mayor parte de la contaminación por ozono y monóxido de carbono proviene de la quema de hidrocarburos por ello esto puede ser una fuente importante de emisiones.

4.4.2 Resultados del cociente O₃/CO

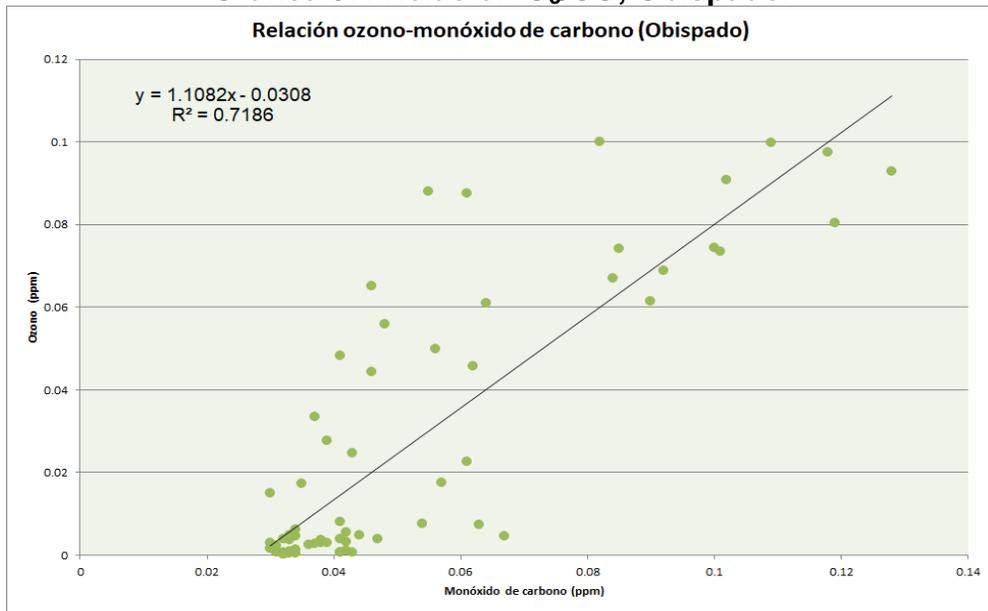
Este método se utiliza para comparar la eficiencia de nuestro modelo respecto a la química del ozono y el monóxido de carbono, con la relación entre estos compuestos se puede corroborar de dónde provienen los contaminantes si son emisiones locales, es decir son originadas en la Zona Metropolitana de Monterrey o son emisiones foráneas, es decir, son emisiones originadas en algún lugar fuera de Monterrey.

Gráfica 36. Relación O₃/CO, Cadereyta.



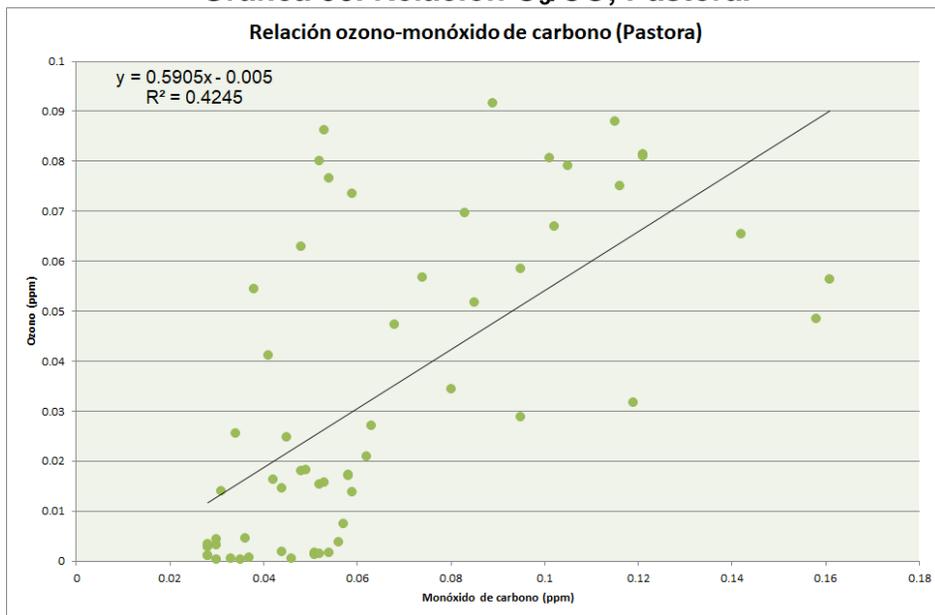
Para Cadereyta de acuerdo a la gráfica 36, la pendiente es negativa, lo cual significa que el ozono prevalece en esta zona, este contaminante es de tiempo de vida corta, por tanto las parcelas son jóvenes y son generadas dentro de Monterrey. De acuerdo con las trayectorias que sigue el ozono, el origen de las emisiones analizado anteriormente se da dentro de Monterrey proveniente de la refinera de Cadereyta, lo cual coincide con este gráfico, por lo tanto la ruta que se muestra en el modelo tiene una buena aproximación.

Gráfica 37. Relación O₃/CO, Obispado.



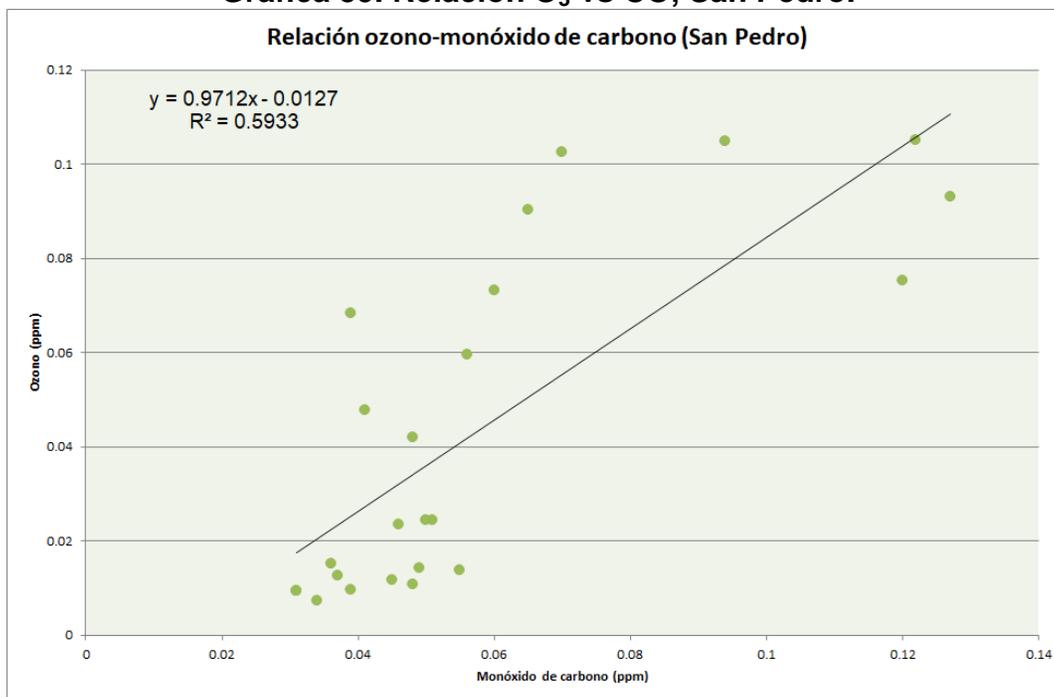
La pendiente para Obispado de acuerdo a la gráfica 37 es positiva, el contaminante más abundante para esta zona es el monóxido de carbono, el cual es un contaminante con un periodo de vida largo, por lo tanto proviene de un lugar situado fuera de Monterrey, de acuerdo a la trayectoria analizada por el modelo WRF-CHEM el origen de los contaminantes es en un fraccionamiento que se encuentra a las afueras de la ZMM, con este es otro indicio que nuestro modelo concuerda con la química de los contaminantes.

Gráfica 38. Relación O₃/CO, Pastora.



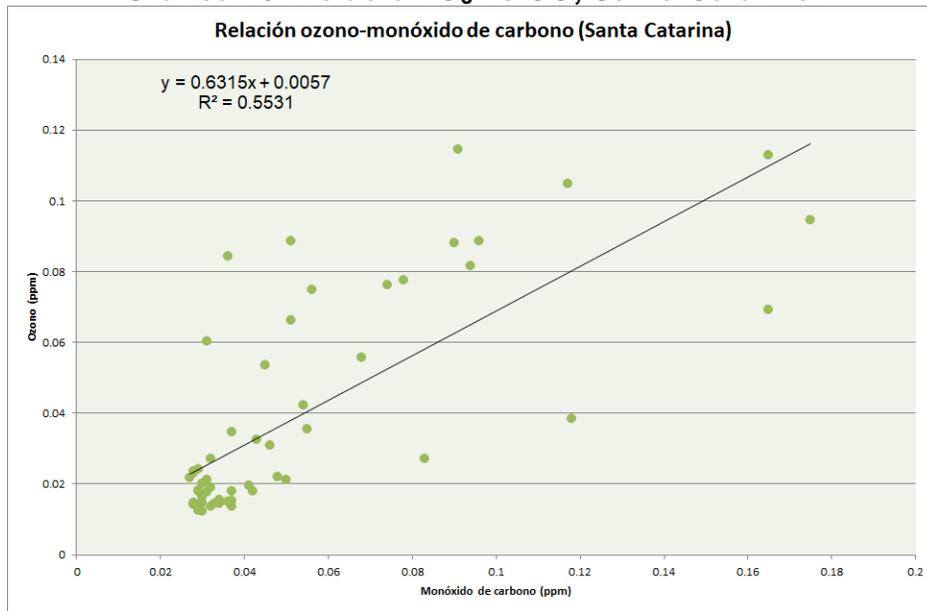
La pendiente de la relación ozono vs monóxido de carbono (gráfica 38) indica que la pendiente es positiva, lo cual indica que el contaminante que prevalece en esa zona es el monóxido de carbono, es decir, las parcelas son envejecidas y provienen de una zona fuera de la ZMM. La trayectoria que arroja el modelo concuerda con esto, debido a que el origen de las emisiones se da en una zona industrial ubicada a fuera de la ZMM.

Gráfica 39. Relación O₃ vs CO, San Pedro.



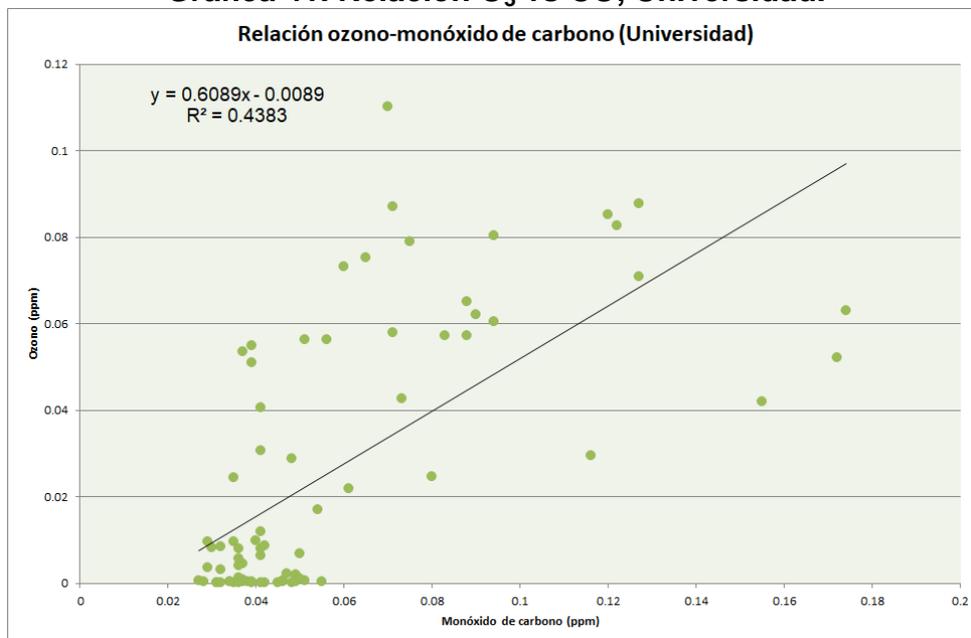
La pendiente de la relación O₃ vs CO para San Pedro es positiva (gráfica 39), el contaminante con mayor concentración en esta zona es el monóxido de carbono, por lo cual las parcelas son envejecidas, es decir, son generadas fuera de Monterrey. De acuerdo a las trayectorias analizadas anteriormente por el modelo WRF-CHEM, el origen de este contaminante se da en la estación de ferrocarriles ubicada fuera de la ZMM, esto representa otro indicio de que las emisiones son generadas por el tráfico automovilístico de la ZMM, producto de las diferentes actividades que realizan las personas que ahí habitan.

Gráfica 40. Relación O₃ vs CO, Santa Catarina.



La relación de datos para Santa Catarina de acuerdo a la gráfica 40 presentan una pendiente positiva, como era de esperarse el contaminante que prevalece en esta zona es el monóxido de carbono, las parcelas son envejecidas, provenientes de un lugar fuera de Monterrey debido a que el modelo WRF-CHEM presenta como resultado una trayectoria de origen en los Villarreales un lugar ubicado fuera de la ZMM.

Gráfica 41. Relación O₃ vs CO, Universidad.



En el gráfico 41 se representa la relación O₃ vs CO, la pendiente es positiva por lo cual las parcelas son envejecidas, el monóxido de carbono es el principal contaminante, su tiempo de vida media es largo, por tanto proviene de una zona fuera de Monterrey. La trayectoria que presenta el modelo WRF-CHEM indica que

el origen de las emisiones es el aeropuerto de Monterrey con ubicación fuera de la ZMM. Con esto podemos corroborar que el origen de las emisiones para la mayoría de las estaciones analizadas proviene de lugares que se encuentra a los alrededores de la ZMM.

4.4.3 Destino de los contaminantes de Monterrey

El ciclo de estancia aérea se inicia con la emisión de contaminantes, seguido de su transporte y emisión en la atmósfera. El ciclo se completa cuando los contaminantes se depositan sobre la vegetación, el ganado, las superficies del suelo y del agua, y otros objetos, cuando son arrastrados de la atmósfera por la lluvia o cuando se escapan al espacio. En algunos casos, los contaminantes se pueden volver a introducir en la atmósfera por acción del viento.

En la imagen 13 se muestra el destino de los contaminantes para cada estación, este es distinto para cada una, esto depende de la intensidad y dirección del viento.

Los contaminantes de Apodaca llegan hasta Coahuila, debido a los vientos que van al norte. Sin embargo para Cadereyta la trayectoria (línea color rosa) que siguen los contaminantes es hacia el noroeste, podemos observar que atraviesan prácticamente toda la ZMM y pero no llegan a cruzar el límite con Coahuila, si no que permanecen en Nuevo León.

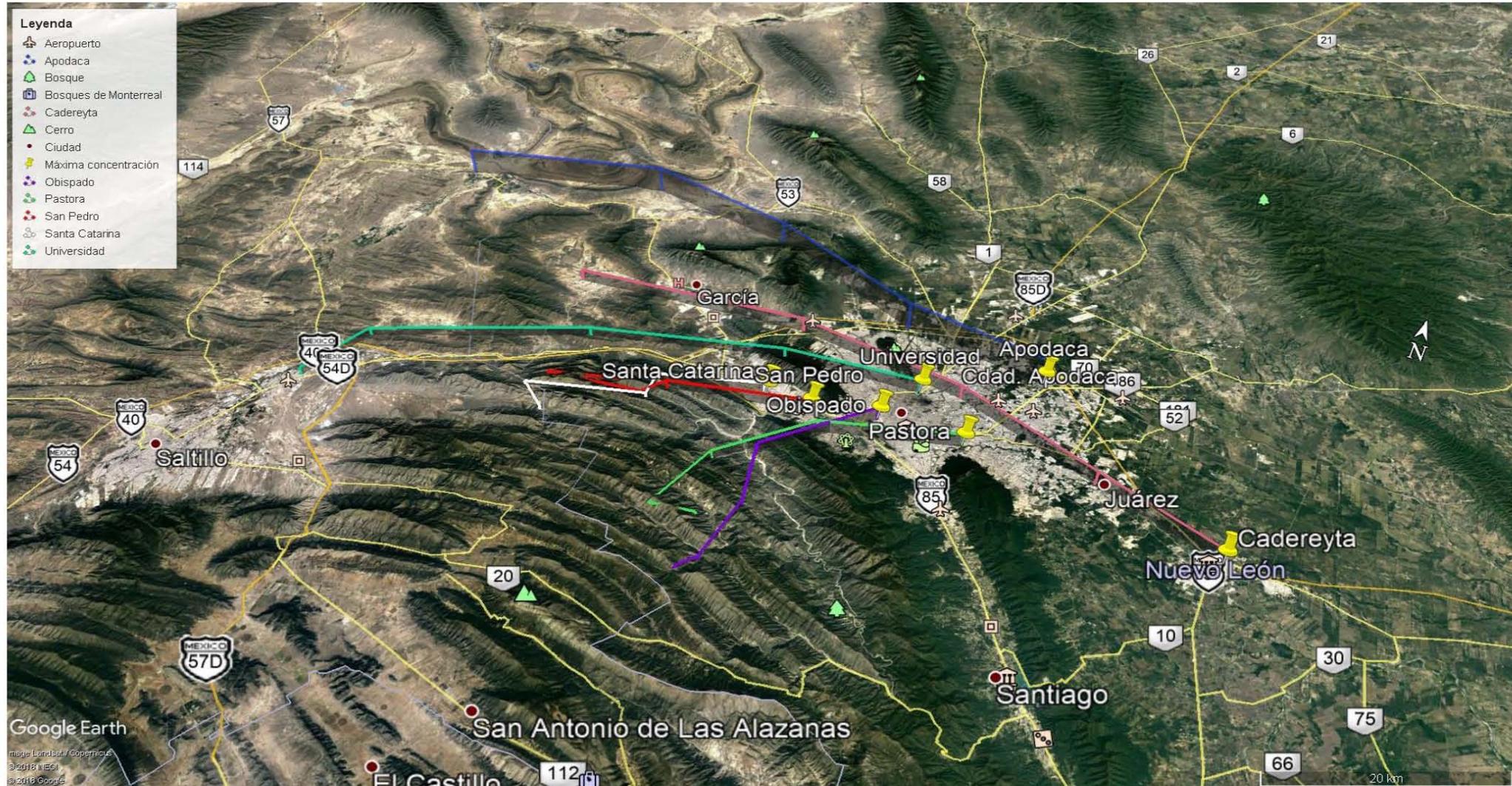
Por otra parte el Destino de emisiones detectadas por la estación Universidad (línea color aguamarina) llega hasta Saltillo, lo cual contribuye a aumentar y generar problemas propios de la contaminación ambiental para los habitantes que residen en esta ciudad.

Las emisiones de San Pedro (línea color blanco) llegan a la frontera entre Monterrey-Saltillo a pesar de la zona montañosa que hay entre estos estados.

Por otra parte las emisiones que son detectadas por la estación de Santa Catarina (línea color rojo) presenta zonas en las que no se ve la trayectoria de color rojo por la falta de datos del SINAICA, pero se percibe que las emisiones regresan y permanecen en Monterrey esto se debe a la cadenas montañosas y a los vientos en esa zona.

El destino de los contaminantes para Obispado y Pastora es hasta la zona Montañosa de Monterrey la cual es muy importante porque los árboles son captadores de partículas en la superficie de sus hojas o bien incorporan gases y contaminantes a través de sus estomas lo cual puede ayudar a disminuir la concentración de contaminantes que se dirigen a Saltillo pero el ozono es un contaminante que afecta la salud de las plantas.

Imagen 15. Destino de los contaminantes en la ZMM.



5. Discusión de resultados

El diagrama de Taylor integra métricas estadísticas que permiten determinar la calidad y proporción de la variación del modelo para explicar los resultados, es decir, conocer que tan alejado está el modelo WRF-CHEM de los datos observados obtenidos del SINAICA para poder conocer las causas de la contaminación en Monterrey y tomar medidas para contrarrestar los efectos causados por las fuentes de emisión.

En este caso para el ozono se obtuvieron mejores resultados en cuanto la relación de los datos analizados, el error RMSE y la forma en la que se encontraban agrupados, a pesar de la desestacionalización de los datos para monóxido de carbono se continuo con errores mayores al 50%, esto sucede por los ajustes que se hicieron en un principio al modificar las fuentes de área, fijas, móviles, etc., para ajustar el modelo a los datos observados que como se mencionó anteriormente se tuvieron que desestacionalizar, hay que tener presente que estos errores son muy frecuentes en las estaciones de monitoreo debido a que los datos observados son enviados como correctos mientras no excedan las 11 ppm que es el límite máximo permitido por la norma.

En el gráfico de regresión del monóxido de carbono (anexo IV) en promedio de todas las estaciones el 8.7% de los datos del modelo se encuentra cerca de la línea de regresión, se puede visualizar también en el anexo V que los datos de las observaciones no se encuentran agrupados sin embargo el modelo WRF-CHEM trata de agruparlos con la información proporcionada por ello en el diagrama de Taylor el modelo tiene poca relación con las observaciones.

En el gráfico del anexo VIII se resumen la información de cada una de las estaciones analizadas de Monterrey, el cual muestra que el modelo WRF-CHEM para el ozono es más eficaz, ya que la relación de los datos simulados con las observaciones es del 48% y la agrupación de los datos es similar al de las observaciones (anexo IX).

Tabla 4. Resumen de concentraciones máximas observadas y trayectorias.

Estación	Contaminante	Fecha-Hora	T (°C)	Radiación (W/m ²)	Máxima concentración (ppm)	Concentración (ppm)	Trayectorias	
					Observaciones	WRF-CHEM	Origen	Destino
Apodaca	CO	15/02/2019 01:00	20.36	--	2.985	2.655	Zona industrial	Frontera Coahuila - Monterrey
Cadereyta	CO	16/02/2019 20:00	30.12	37	3.445	0.2884	Refinería	Zona cerca del municipio García
	O ₃	15/02/2019 15:00	35.77	550	0.093	0.0594		
Escobedo	CO	16/02/2019 11:00	31.4	475	2.945	0.8262		
Obispado	CO	15/02/2019 09:00	21.12	127	3.175	6.489	Zona habitacional	Límite Monterrey-Coahuila
	O ₃	15/02/2019 16:00	34.53	551	0.103	0.092		
Pastora	CO	14/02/2019 11:00	21.1	363	1.805	2.733	Zona industrial y habitacional	Límite Monterrey-Coahuila
	O ₃	16/02/2019 15:00	35.79	453	0.136	0.056		
San Pedro	CO	16/02/2019 13:00	33.39	665	1.895	1.194	Zona habitacional e industrial	Cerro de la silla
	O ₃	16/02/2019 15:00	34.26	566	0.149	0.09		
Santa Catarina	CO	14/02/2019 08:00	12.21	--	4.935	1.846	Población rural	Cerro de la silla
	O ₃	16/02/2019 16:00	34.27	455	0.15	0.094		
Universidad	CO	16/02/2019 13:00	33.19	667	1.895	0.7734	Aeropuerto	Saltillo
	O ₃	16/02/2019 15:00	33.85	567	0.149	0.063		

Las variaciones y características meteorológicas influyen de manera importante en el aumento o disminución de los contaminantes. Por ejemplo, para el ozono de acuerdo a la tabla 4, la mayor concentración en la mayoría estaciones se da el día 16 a las 15:00 horas con temperaturas superiores a los 30°C y una radiación de más de 400 W/m². Sin embargo para el monóxido de carbono las condiciones meteorológicas que provocan una mayor concentración varían de altas o bajas temperaturas y radiaciones generalmente entre 11:00 am y la 13:00 pm con una humedad mayor al 30% solar baja.

Es indispensable identificar la fuente de emisión de los contaminantes para así tomar medidas o acuerdos que ayuden a preservar la calidad del aire en Monterrey. Se obtuvieron las trayectorias de todas las estaciones con excepción de Escobedo que daba resultados inestables. Las probables fuentes de emisión de contaminantes (tabla 4) se ubican a las afueras de la ZMM entre ellas se encuentran fuentes móviles como automóviles, ferrocarriles y aviones; fuentes puntuales como una refinería y la planta automotriz; fuentes naturales: como actividades agropecuarias.

Además de realizar el seguimiento de las trayectorias horas atrás e identificar los lugares de los que probablemente provienen las emisiones, se logró corroborar que el modelo WRF y el cociente O₃/CO arrojan el mismo análisis de resultados ya que para Cadereyta existe más de ozono y en las demás estaciones hay más presencia de monóxido de carbono esto indica que la mayoría de las emisiones provienen de lugares fuera de la ZMM.

De acuerdo a los resultados obtenidos (tabla 4) sobre el destino de los contaminantes generados en Monterrey las corrientes de aire y la intensidad del viento provocan que los contaminantes como el ozono se dirijan a Saltillo aun cuando entre estas dos ciudades exista una zona montañosa de gran importancia.

6. Conclusiones

A través del modelo WRF-CHEM se encontró un periodo de estudio del 14 al 16 de febrero del 2019 con una concentración alta ozono y por la relación, también se eligió al monóxido de carbono para la simulación, ambos presentaban concentraciones altas en el mes de febrero y se encontró que el ozono excedía las 0.095 ppm que es el límite máximo permisible que establece la NOM-SSA1-020-2014 mientras que el monóxido de carbono presento datos por debajo de lo que establece la NOM-023-SSA1-1993 después de la desestacionalización de los datos observados del SINAICA.

De acuerdo a los resultados obtenidos de la simulación del modelo WRF-CHEM, el ozono presenta mejor relación, un menor error RMS y una mejor agrupación con los datos observados que el monóxido de carbono, siendo Cadereyta la estación

con mejores resultados de datos para ozono (O_3) y Santa Catarina para el monóxido de carbono (CO).

Se concluye que el principal origen de las emisiones de monóxido de carbono y ozono de Monterrey provienen de la quema de combustibles fósiles producto del tráfico automovilístico, el aire acondicionado de los automóviles o casas por la percepción de un clima caluroso en la ZMM y las actividades industriales, las condiciones meteorológicas contribuyen al aumento de la concentración de los contaminantes, por ejemplo las reacciones que generan ozono (O_3) se ven favorecidas por temperaturas mayores a $30^{\circ}C$ y radiación mayor a $400 W/m^2$, mientras que el monóxido de carbono presenta concentraciones máximas tanto en temperatura y radiación alta como baja, los resultados de las trayectorias indican que el ozono tiene una mayor concentración en la zona montañosa pero la intensidad del viento hace que se disperse a Saltillo.

Recomendaciones

- Para mejorar la calidad del modelo en relación con los datos observados se recomienda hacer ajustes al modelo mediante algún modelo matemático.
- El cociente O_3/CO indica que para algunas estaciones las fuentes de emisión están dentro de la ZMM por ello se tendrá que hacer un análisis más exhaustivo para saber con precisión la hora y el lugar de donde provienen las emisiones para esas estaciones.
- Se recomienda que hacer un estudio más detallado para saber la concentración y efectos de los contaminantes provenientes de Monterrey que afectan a Salto

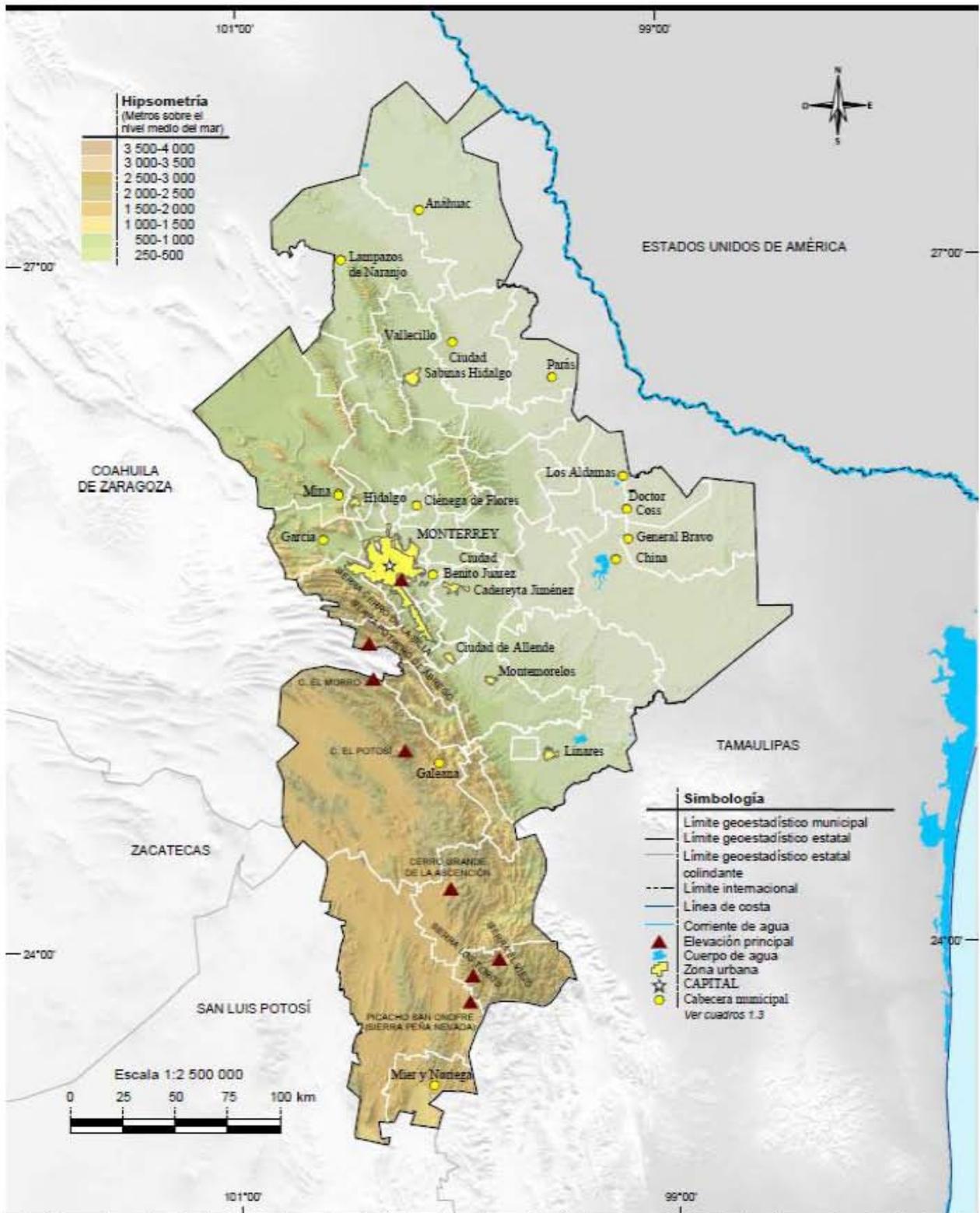
7. Bibliografía

- [1] M. R. Placeres, F. D. Olite, and M. Á. Toste, “La contaminación del aire: Su repercusión como problema de salud,” *Rev. Cubana Hig. Epidemiol.*, vol. 44, no. 2, pp. 22-53, 2006.
- [2] V. Ballesteros, “Urbanismo, medio ambiente y salud,” *Unión Eur.*, pp. 1–49, 2011.
- [3] E. D. L. Romero, *Mujeres y hombres en México*. p. 3, 2018.
- [4] L. A. Actividad and D. E. L. Conacyt, “Nuevo León,” *Conacyt*, p. 10, 2009.
- [5] G. Garza, “El area metropolitana de Monterrey en el año 2020.,” *Estud. demográficos y urbanos*, vol. 13, no. 3, pp. 667–673, 1998.
- [6] P. Planchette, “Informe sobre el Comercio Mundial 2013,” *Organ. Mund. del Comer.*, p. 335, 2013.
- [7] INEGI, “Mujeres y hombres en México 2011,” *Intituto Nac. Estadística y Geogr.*, pp. 1–252, 2012.
- [8] A. L. U. De Información, *Saldllo Cuaderno de Inlormaclón Básica para la Planeaclón unlcplal información*. .
- [9] J. Eduardo and M. C. 'l, “Crecimiento y especialización en la región Saltillo-Ramos Arizpe,” 1995.
- [10] C. Victoria, D. Económico, and D. Frontera, “Nuevo Laredo :,” 2008.
- [11] Herrera Cárdenas Juan, “Introducción al estudio del medio ambiente,” p. 125, 2018.
- [12] M. Mosso, C. Ullán, and M. Rosa, “El aire: hábitat y medio de transmisión de microorganismos,” *Obs. Medioambient.*, vol. 5, no. 5, pp. 375–402, 2002.
- [13] C. Kadilar, “Preface of the ‘advanced Statistical Methods and Applications,’” *AIP Conf. Proc.*, vol. 18, pp. 45-50, 2017.
- [14] J. Téllez, A. Rodríguez, and A. Fajardo, “[Carbon monoxide contamination: an environmental health problem].,” *Rev. Salud Publica (Bogota).*, vol. 8, no. 1, pp. 108–17, 2006.
- [15] E. C. Martínez and D. J. Beltrán, *Manual II Dirección y diseño*, pp. 13-15, 2016.
- [16] D. provincial de Sevilla, *Efectos nocivos del humo de la combustion sobre la salud y el medio ambiente*. Sevilla, 2017.

- [17] A. Martín Ruiz, I. Rodríguez Gómez, C. Rubio, C. Revert, and A. Hardisson, "Efectos tóxicos del tabaco," *Rev. Toxicol.*, vol. 21, no. 2–3, pp. 64–71, 2004.
- [18] B. P. J. Madigan Michael T, Martindo Jhon, "Ozono," p. 14, 2017.
- [19] V. Bermejo Bermejo, R. Alonso del Amo, S. Elvira Cozar, I. Rábago Juan-Aracil, and M. García Vivanco Instituciones colaboradoras, "*El ozono troposférico y sus efectos en la vegetación*", pp. 16-28, 2009.
- [20] S. de la Comisión para la Cooperación Ambiental, "*El mosaico de América del Norte: panorama de los problemas ambientales más relevantes-Ozono troposférico*", no. 4, p 17, 2017.
- [21] C. de Agricultura, "¿Cuál es el origen del ozono en la atmósfera?," pp. 13–16, 2009.
- [22] Dirección de Monitoreo Atmosférico, "¿ Qué es el ozono ? *El ozono como contaminante del aire*," no. 10, pp. 16-20, 2016.
- [23] E. S. R. A. Bravo Humberto, "*Fuentes de contaminación atmosférica e inventario de emisiones*," pp. 1–25, 1990.
- [24] SEMARNAT, "Atmósfera," *Informe de la Situación del Medio Ambiente en México.*, p. 6, 2016.
- [25] C. De Miguel and M. Tavares, *El desafío de la sostenibilidad ambiental en América Latina y el Caribe.*, p. 15, 2015.
- [26] C. J. Manuel, "Contaminación Atmosférica", pp. 9-12, 2008.
- [27] César Augusto Arciniégas Suárez, L. A. Issn, "*Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable pm 10*", no. 34, pp. 195–213, 2012.
- [28] P. B. Morera and C. C. Araya, "*Intoxicación por monóxido de carbono*," vol. 3, no. 1, pp. 45-56, 2017.
- [29] N. Manuel, "*Contaminación atmosférica y salud*," vol. 14, pp. 29–33, 2007.
- [30] H. Benavides and G. León, "*Gases de efecto invernadero*," p. 11, 2007.
- [31] A. M. C. Andres, G. Fuentes, and M. C. A. M. Blake, "*Manual de ingeniería ambiental*", pp. 1–119, 2000.
- [32] R. P. Fernandez, D. G. Allende, F. Castro, P. Cremades, and E. Puliafito, "*Modelado regional de la calidad de aire utilizando el modelo WRF/Chem: Implementación de datos globales y locales para Mendoza*," *Av. en Energías Renov. y Medio Ambient.*, vol. 14, no. May 2014, pp. 43–50, 2010.
- [33] J. Dudhia, "*The weather research and forecasting model: 2009 annual update*", no.2, pp. 25-36, January 2007, 2014.

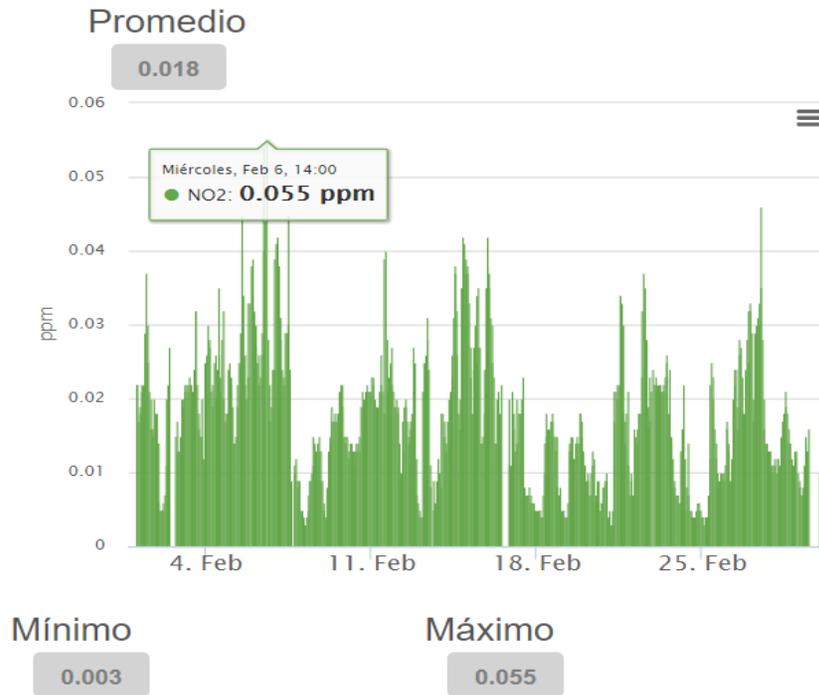
- [34] U. Cenaped, "*Descripción del sistema de pronóstico numérico operacional para eventos extremos de las condiciones meteorológicas,*" pp. 4-17, 2017.
- [35] B. Elsy, C. Laura, and C. Jacqueline, "*Aplicación del Modelo Mesoescalar WRF en la Modelación Hidrológica de la Cuenca del Río Sucio,*" p. 413, 2017.
- [36] C. Arango and J. F. Ruiz, "*Implementación del modelo wrf para la sabana de bogotá Arango, C. & Ruiz, J.F.,*" p. 7, 2011.
- [37] W. P. S. Workbench, "*WPS Workbench,*" p. 3-4, 2019.
- [38] L. C. A. V. L. Méndez, "*Pronóstico de ciclones tropicales en el océano pacífico con el modelo WRF*", pp. 13-25, 2009.
- [39] J. Dudhia, "WRF Modeling System Overview", p. 1-16, 1996.
- [40] L. Rafael and A. Lighezzolo, "*Tesis de Maestría Integración de modelos numéricos de alerta temprana a emergencias* ", pp 12-23, 2018.
- [41] A. . Guerrero-Higueras, García-Ortega, and Matellán-Olivera, "*Procesamiento paralelo de pronósticos meteorológicos del modelo WRF mediante NCL*", pp. 2-8, 2011.
- [42] A. R. Hernández, "*Calidad del aire*", pp. 11-14, 2015.
- [43] C. F. para la P. contra R. Sanitarios, "*Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire , SINAICA,*" pp. 1–2, 2019.
- [44] C. Laguna, "*Correlación y regresión lineal*", pp. 1–18, 2003.
- [45] D. Montgomery C., *Probabilidad y estadística para ingeniería y administración*, 3ra edició. México, pp. 34-65, 1996.
- [46] P. Vinuesa, "*Tema 8 - Correlación : teoría y práctica,*" pp. 1–26, 2016.
- [47] J. M. Domenech, "*Coeficiente de correlación lineal de pearson* " vol 1," pp. 1–20, 1985.
- [48] K. E. Taylor, "Taylor Diagram Primer," no. 2, pp. 2-3, January, 2005.
- [49] S. Mejia and J. F. Ruiz, "Validacion de los pronosticos de precipitación con los modelos gfs, mm5, wrf, cmm5 y cwrf sobre el territorio colombiano" pp. 5-7, 2006.
- [50] C. S. Mariano, *Ingeniería del medio ambiente aplicada al medio ambiente continental*, 2da edición, pp. 14-27, 1999.

Anexo I. Relieve del estado de Nuevo León

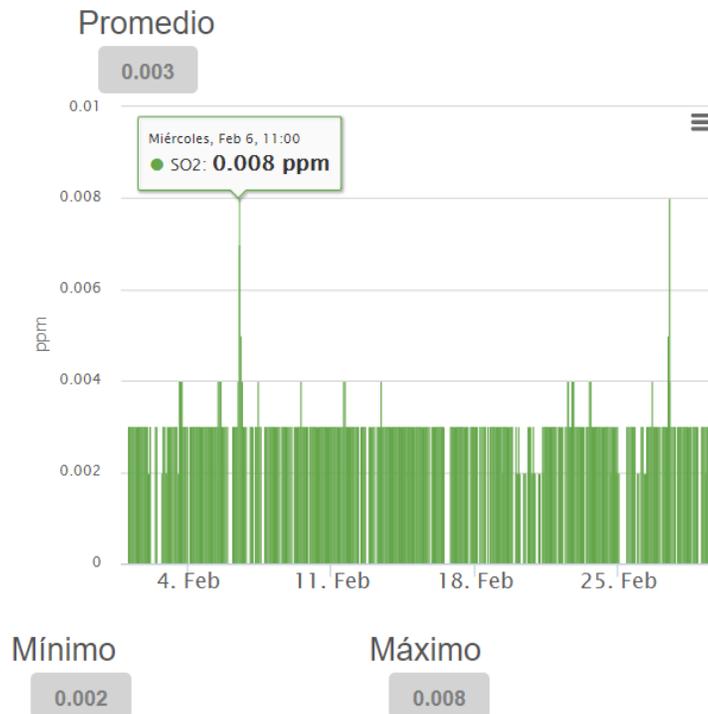


Anexo II. Datos de Monitoreo Obispado de SINAICA

Monóxido de nitrógeno

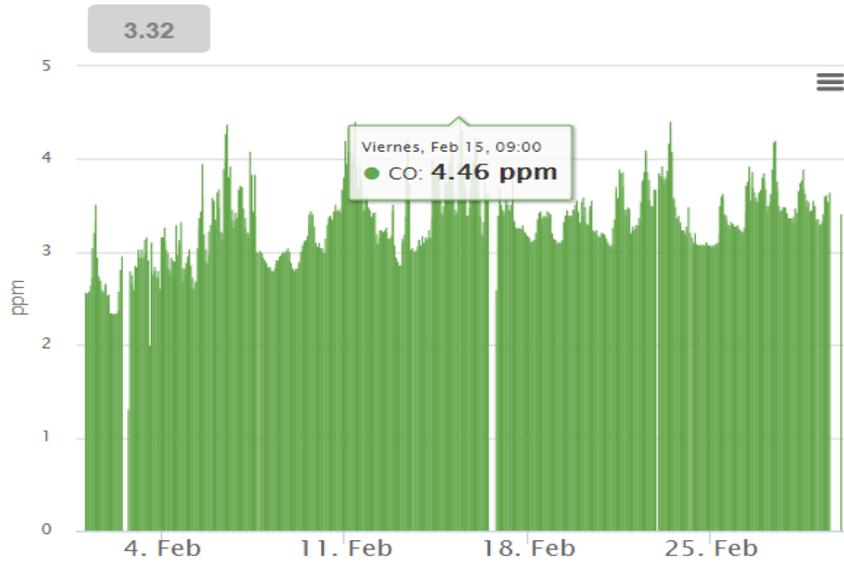


Dióxido de azufre



Monóxido de carbono

Promedio



Mínimo

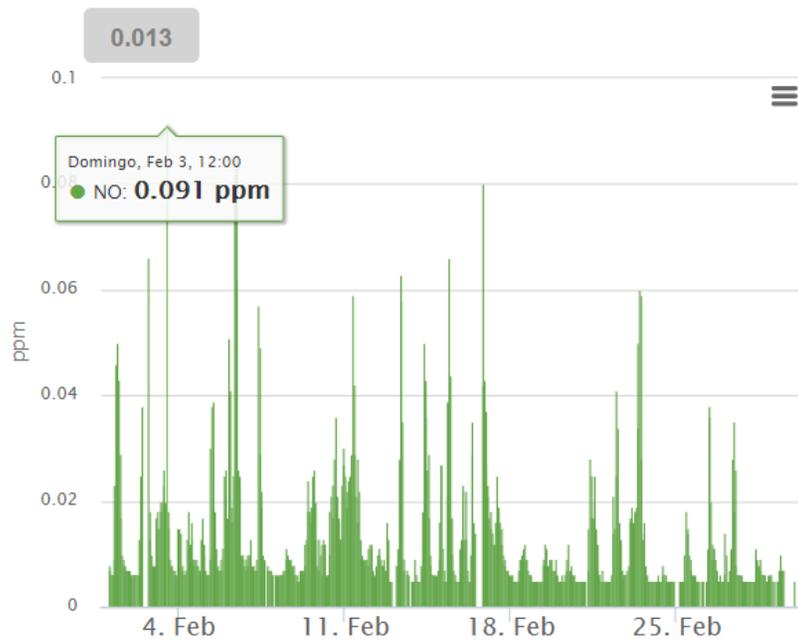
1.31

Máximo

4.46

Óxido nítrico (NO)

Promedio



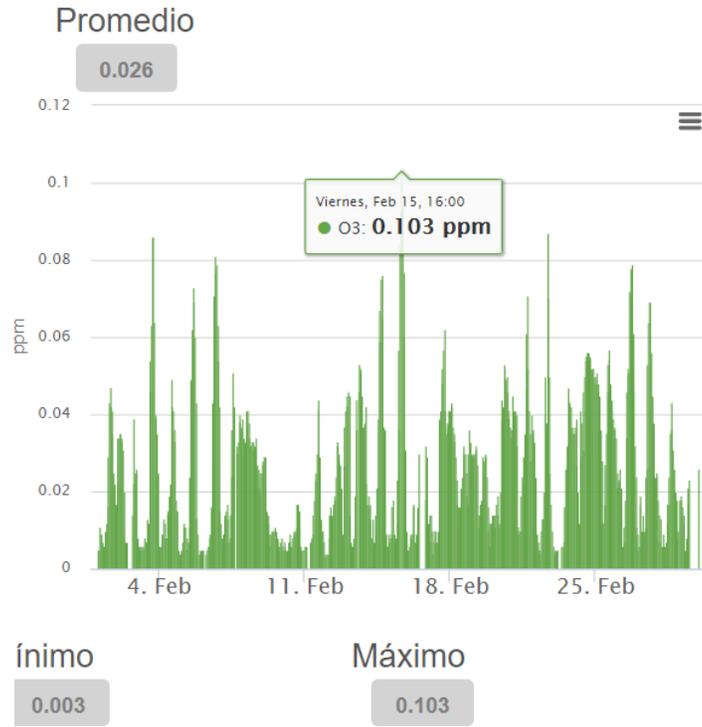
Mínimo

0.005

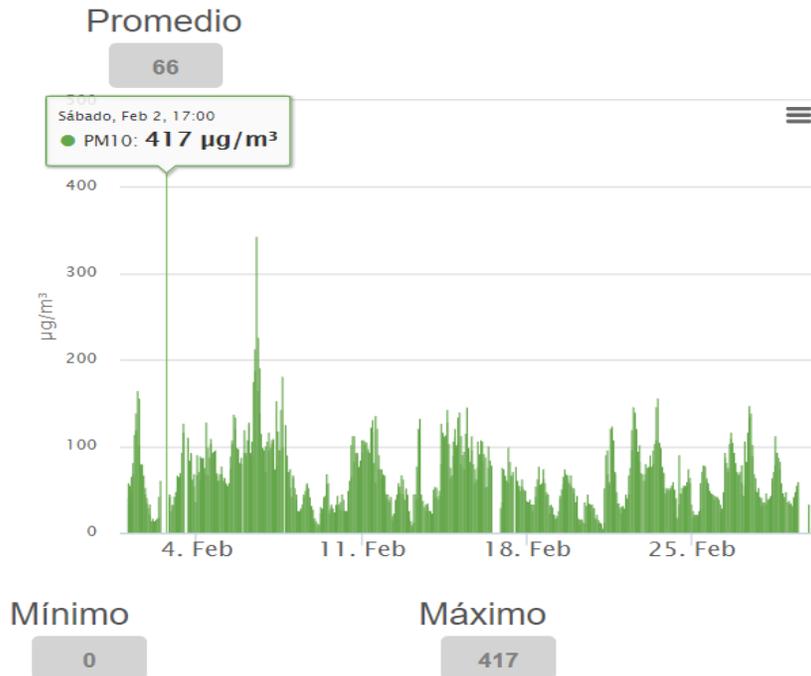
Máximo

0.091

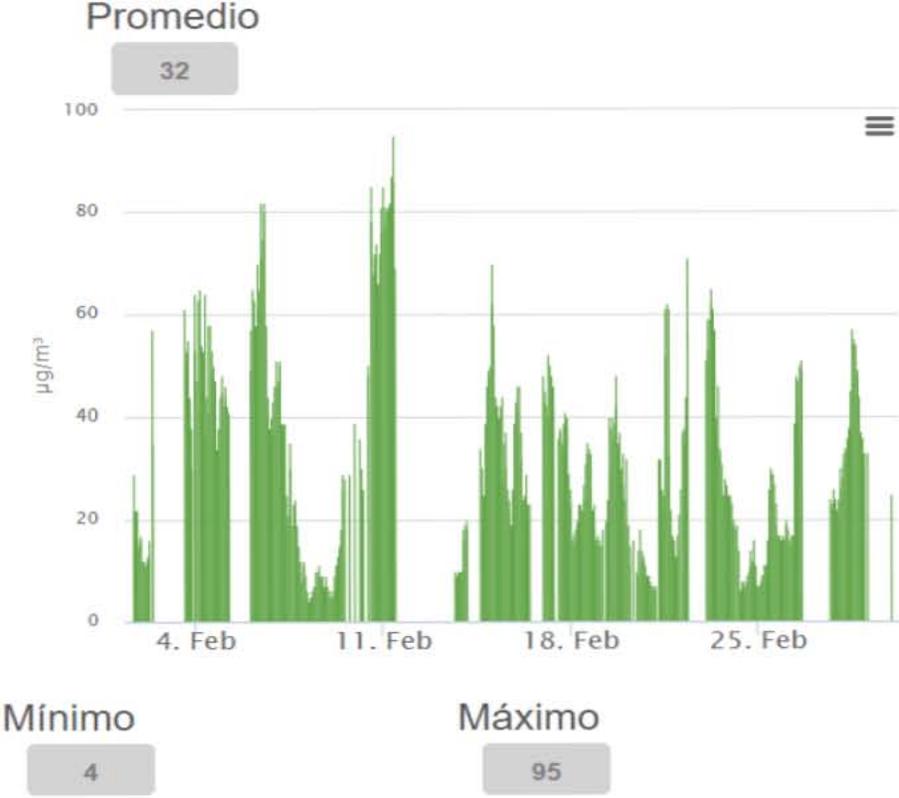
Ozono (O₃)



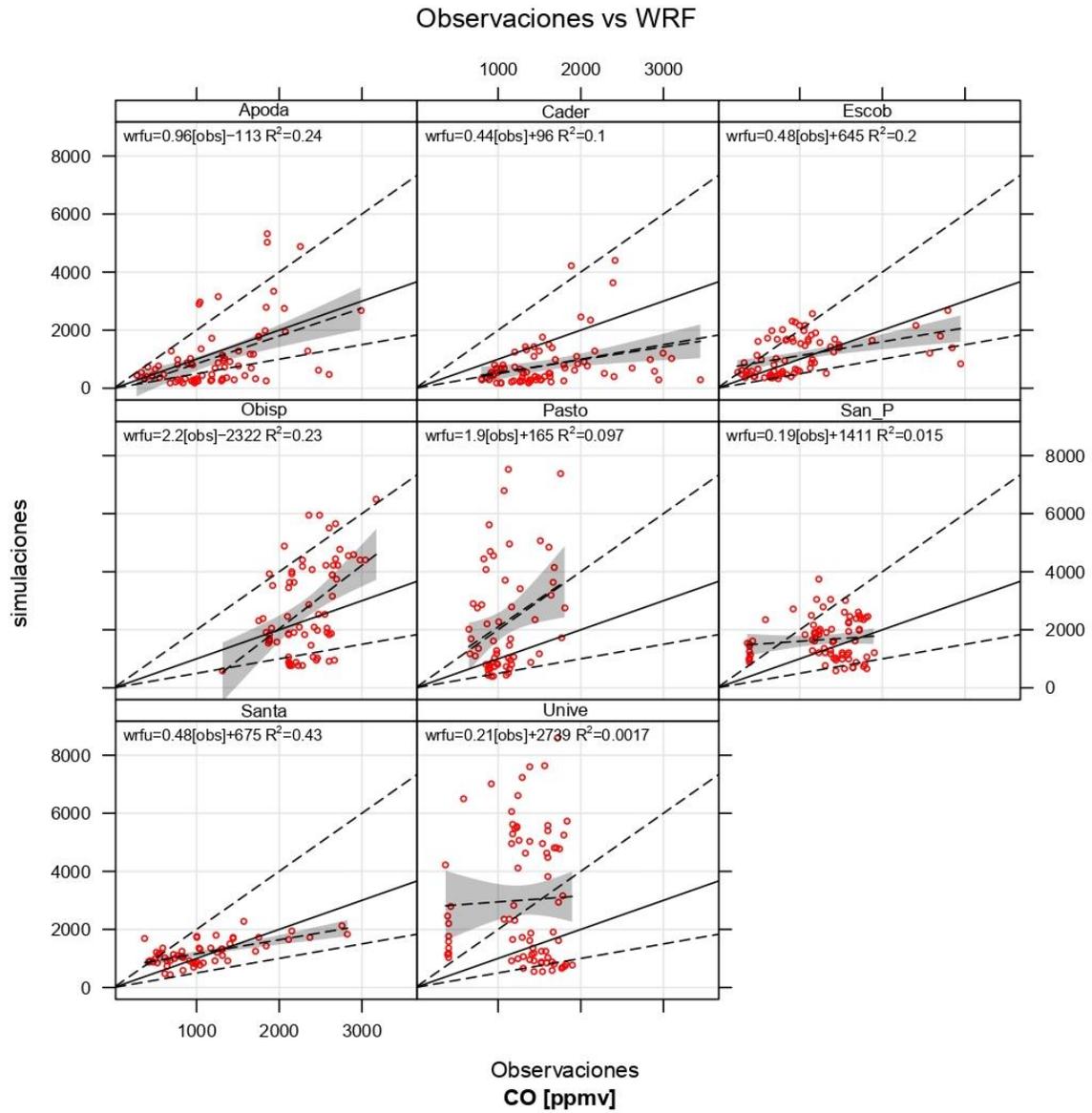
Partículas menores a 10 micras (PM₁₀)



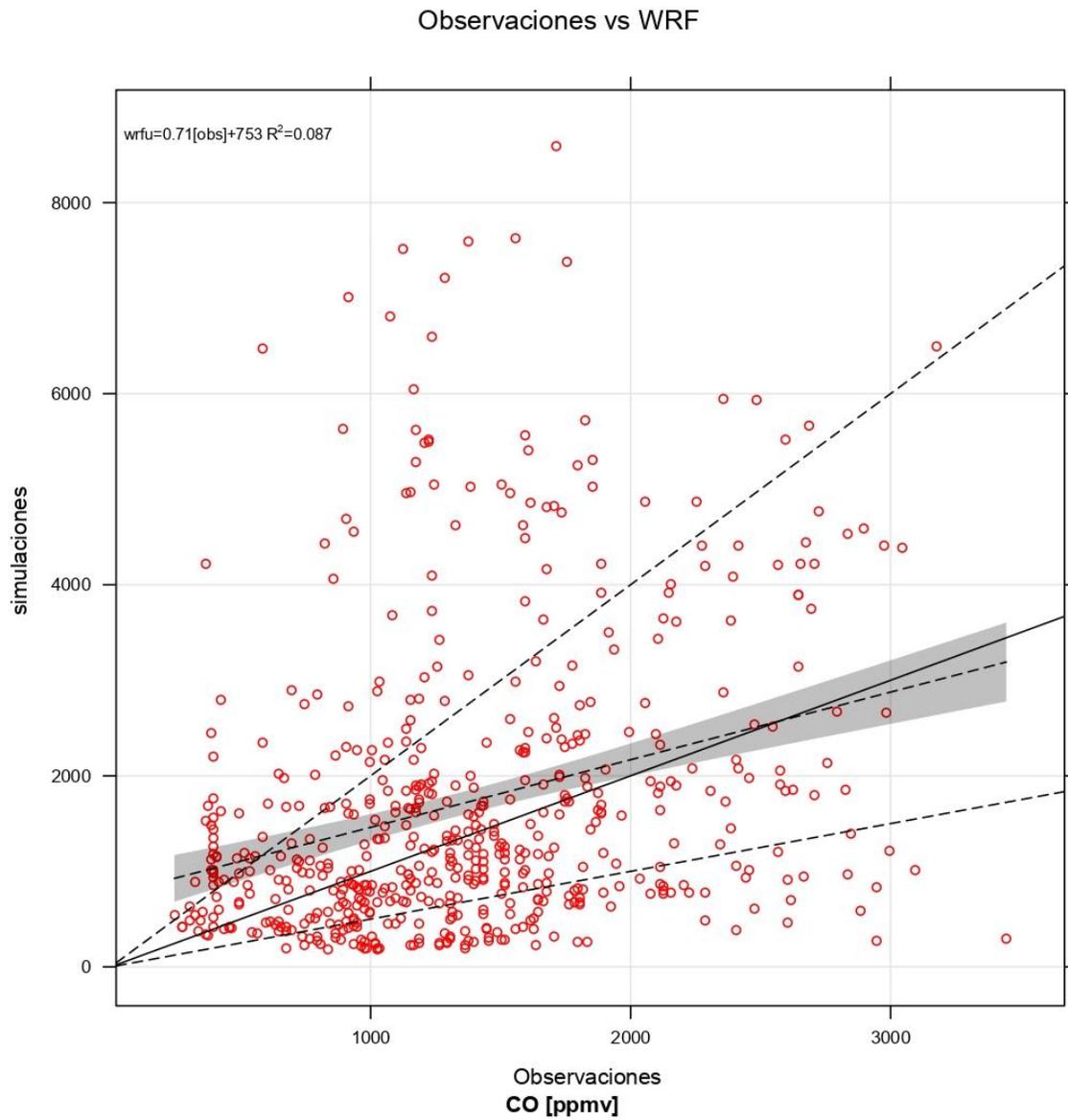
Partículas menores a 5 micras (PM₅)



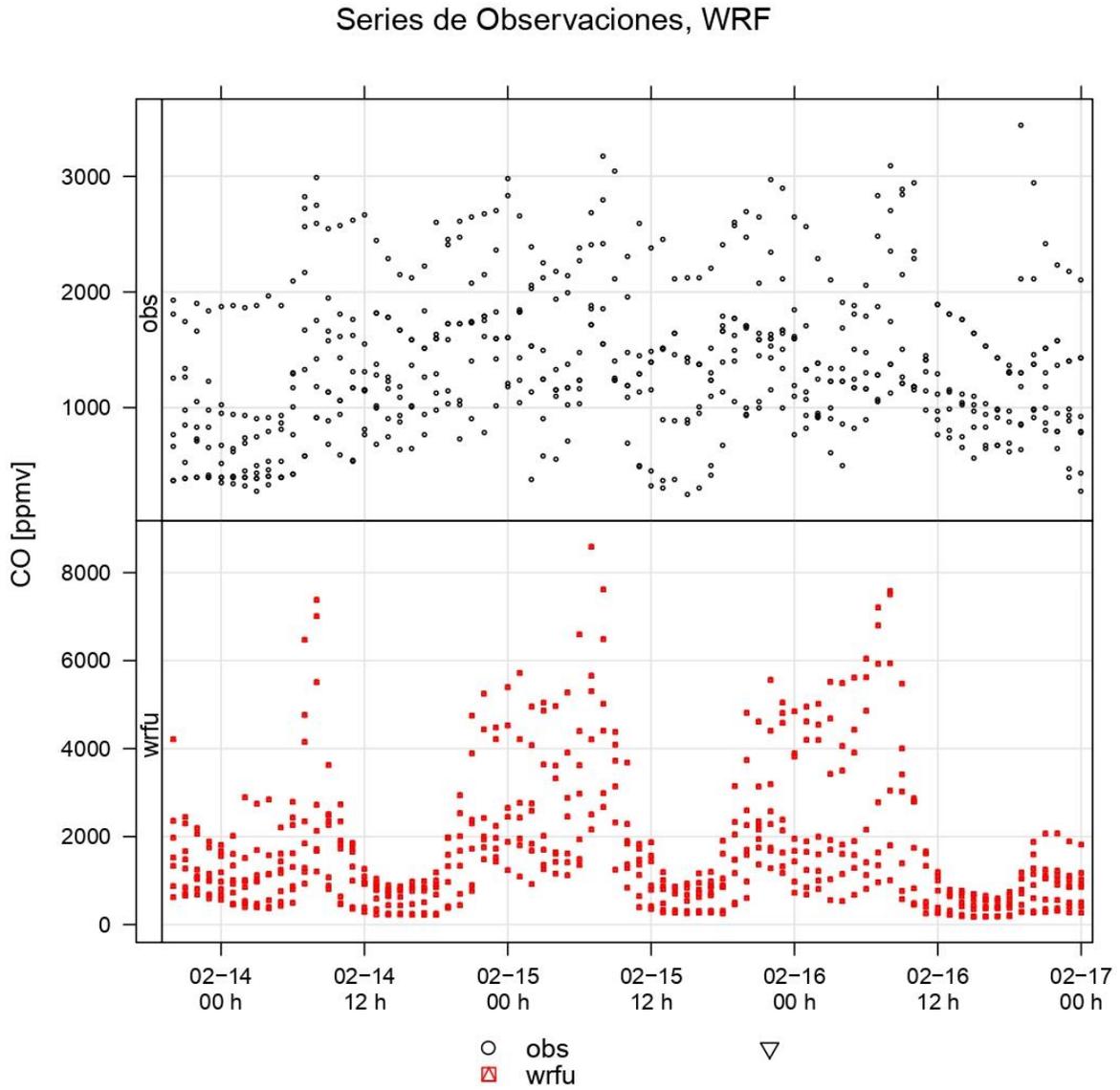
Anexo III. Regresión lineal por estación de monóxido de carbono



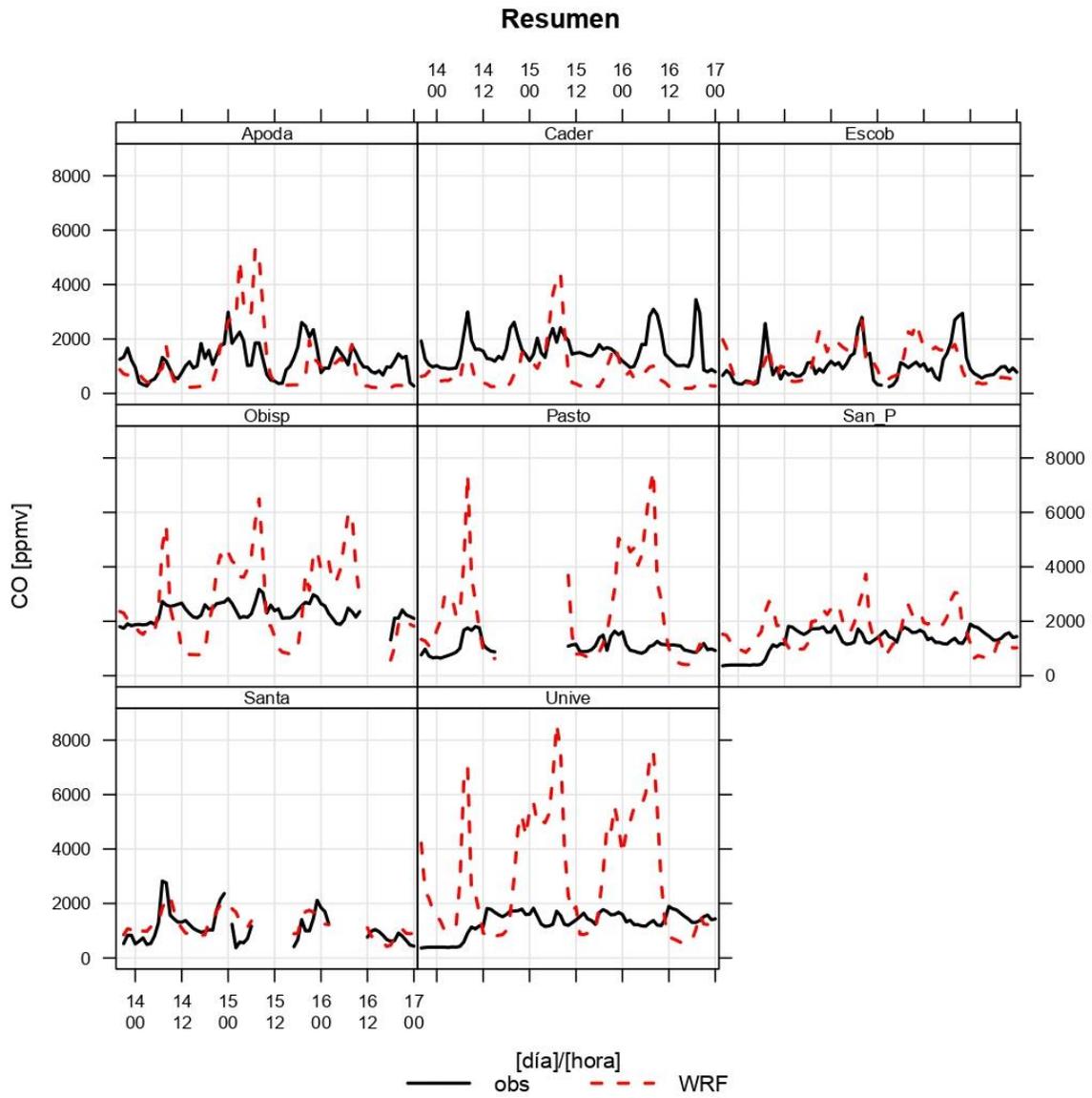
Anexo IV. Resumen de la regresión lineal de monóxido de carbono



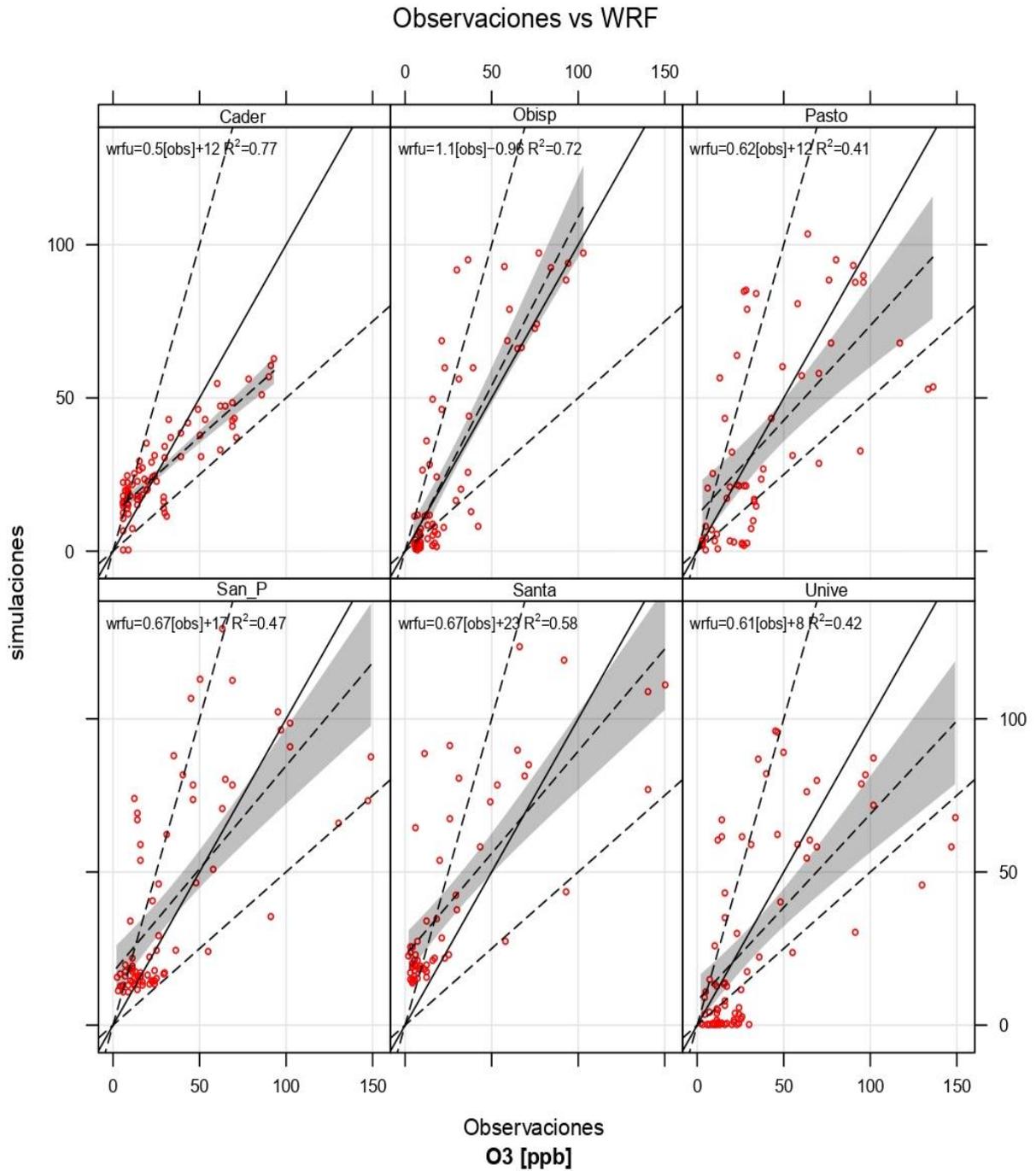
Anexo V. Resumen de la comparación de datos del WFR vs observaciones (CO)



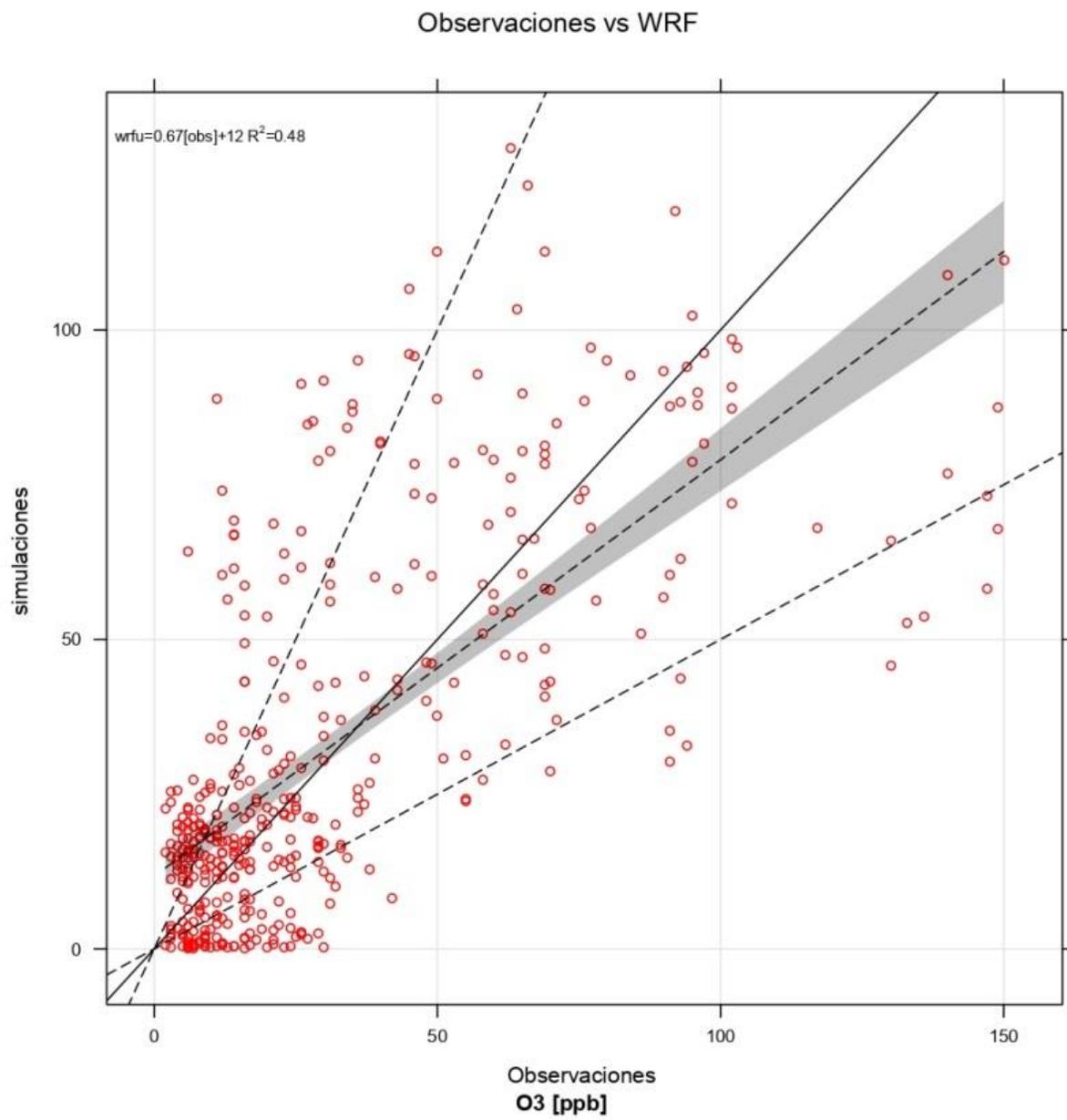
Anexo VI. Resumen de la comparación de datos del WFR vs observaciones por estación (CO)



Anexo VII. Regresión lineal por estación de ozono

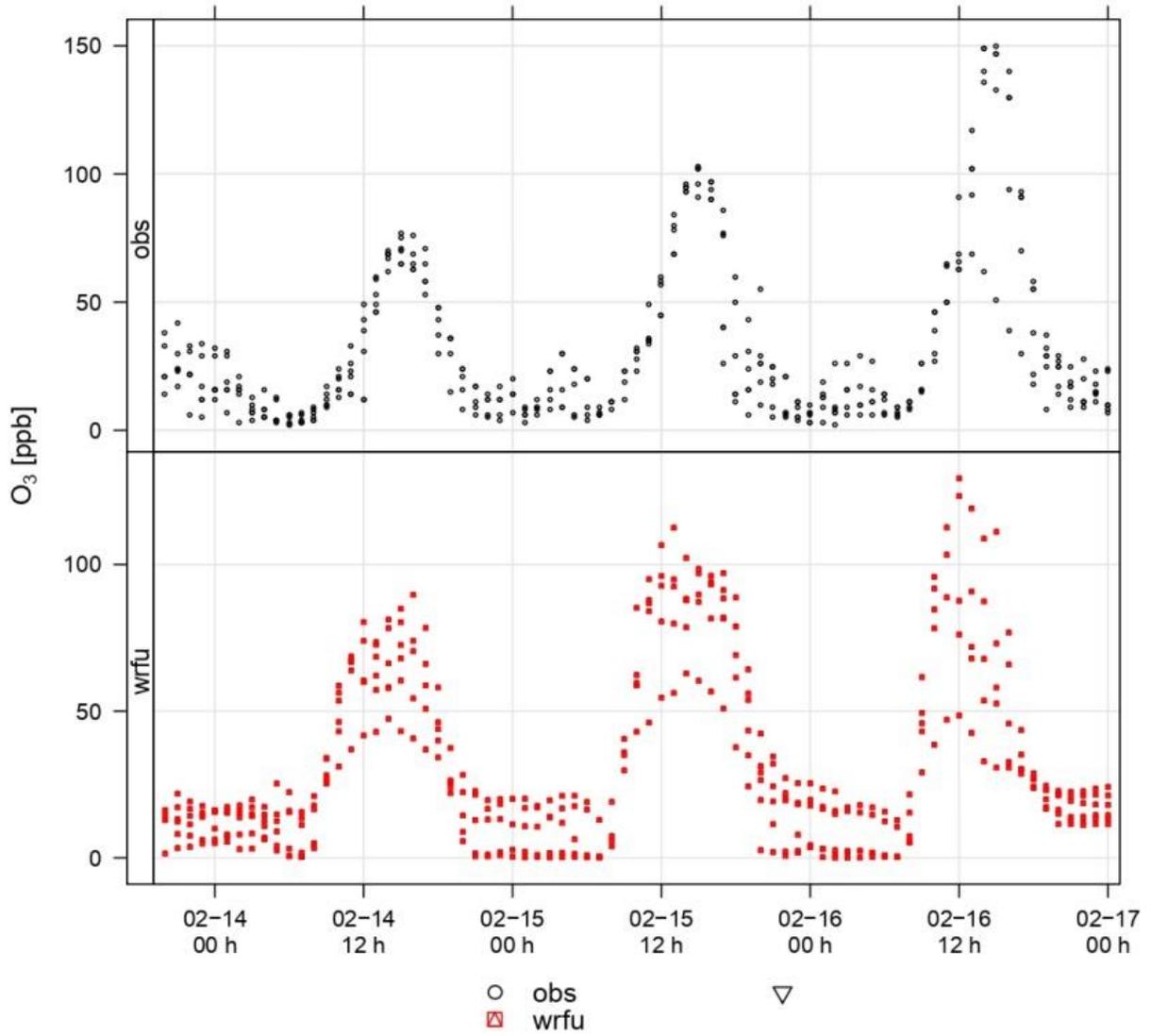


Anexo VIII. Resumen de la regresión lineal de ozono

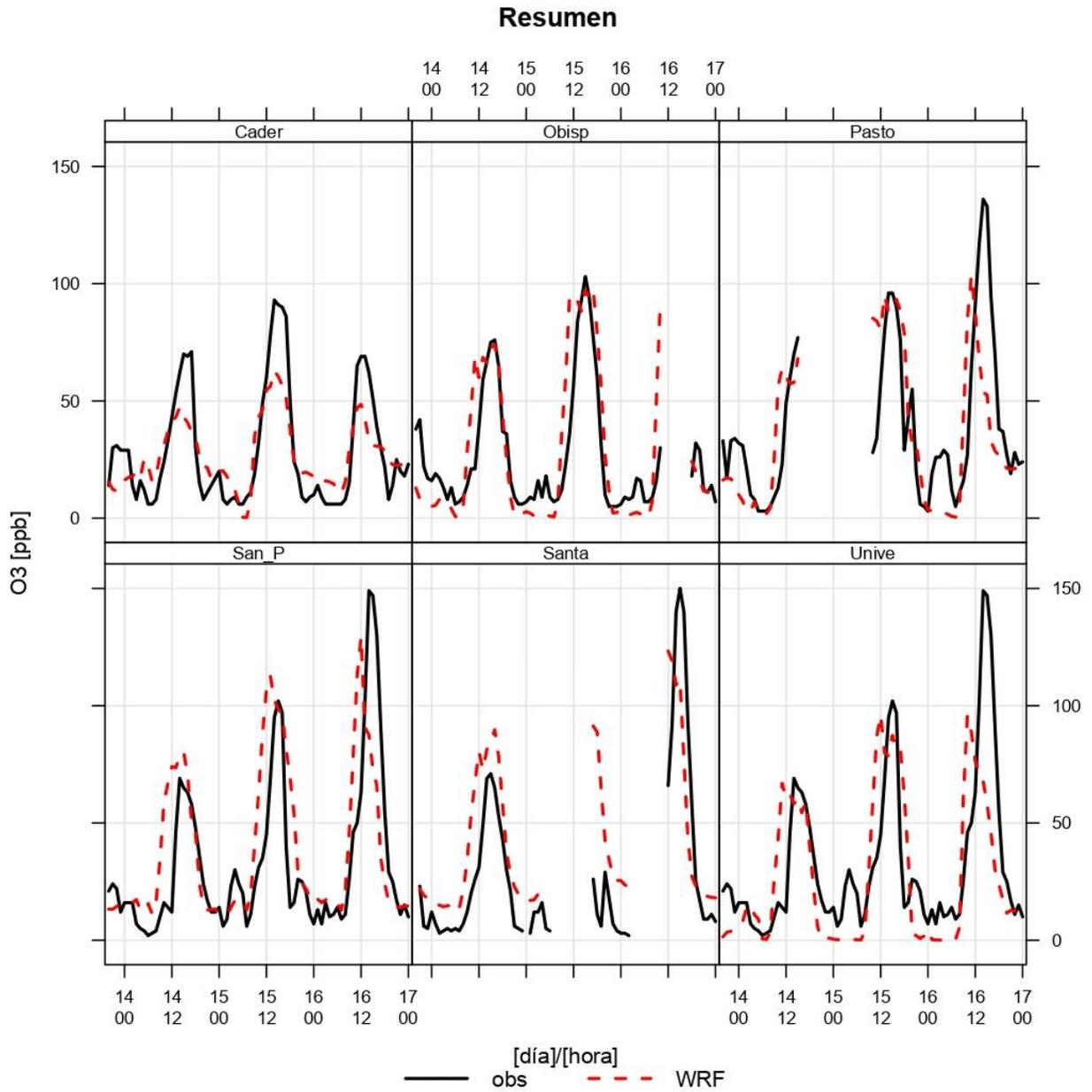


Anexo IX. Resumen de la comparación de datos del WFR vs observaciones (O₃)

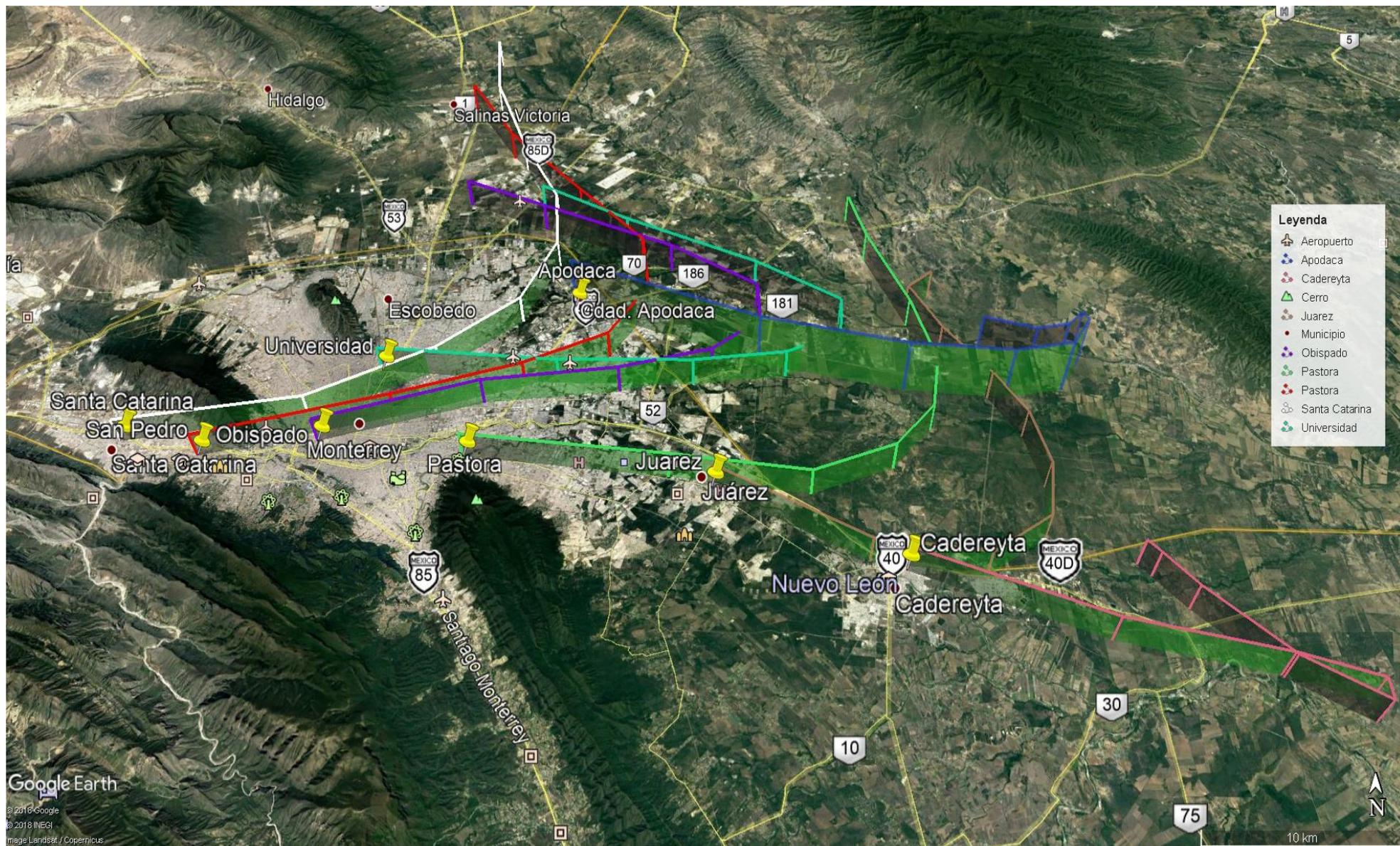
Series de Observaciones, WRF



Anexo X. Resumen de la comparación de datos del WFR vs observaciones por estación (CO)



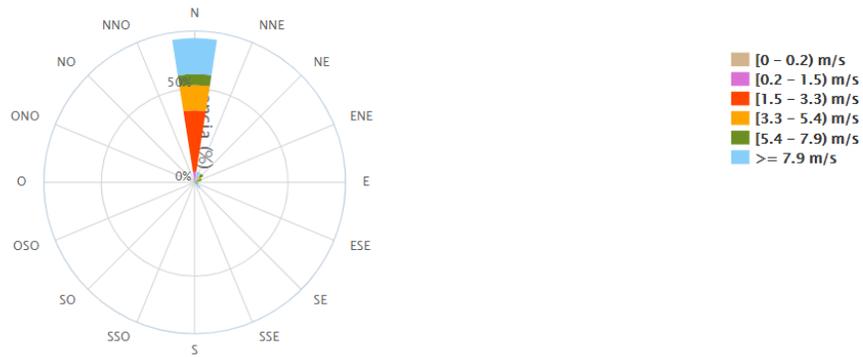
Anexo XI. Trayectorias del origen de los contaminantes



Anexo XII. Rosa de los vientos por estación

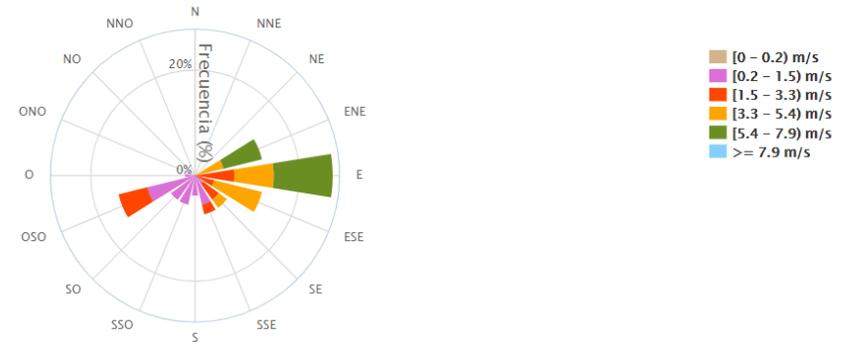
Rosa de vientos, estación Santa Catarina

Datos del 2019-02-14 a 2019-02-16 (de las 0 a las 23 horas)



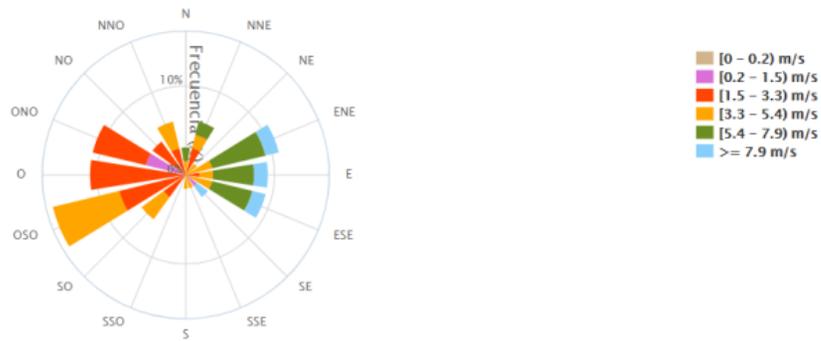
Rosa de vientos, estación Universidad

Datos del 2019-02-14 a 2019-02-16 (de las 0 a las 23 horas)



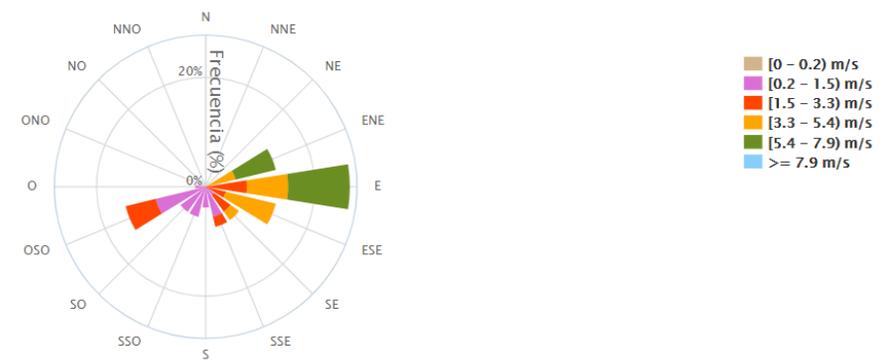
Rosa de vientos, estación Obispo

Datos del 2019-02-14 a 2019-02-16 (de las 0 a las 23 horas)

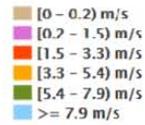
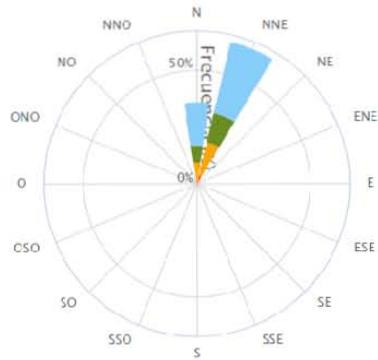


Rosa de vientos, estación San Pedro

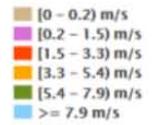
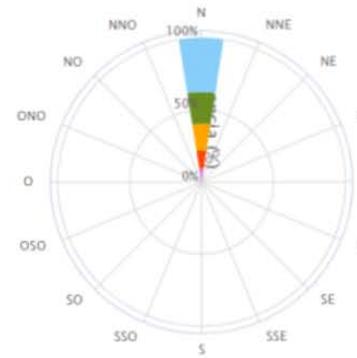
Datos del 2019-02-14 a 2019-02-16 (de las 0 a las 23 horas)



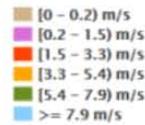
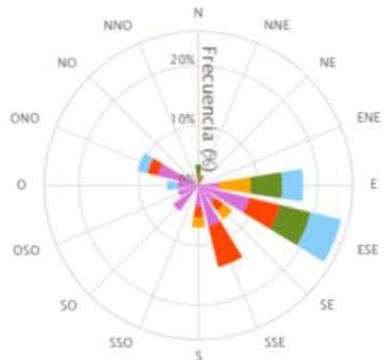
Rosa de vientos, estación La Pastora
 Datos del 2019-02-14 a 2019-02-16 (de las 0 a las 23 horas)



Rosa de vientos, estación Apodaca
 Datos del 2019-02-14 a 2019-02-16 (de las 0 a las 23 horas)



Rosa de vientos, estación Escobedo
 Datos del 2019-02-14 a 2019-02-16 (de las 0 a las 23 horas)



Rosa de vientos, estación Cadereyta
 Datos del 2019-02-14 a 2019-02-16 (de las 0 a las 23 horas)

