



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE CIENCIAS

**Estudio de la calidad del aire de la ciudad de
Querétaro en el año 2013**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciado en Ciencias de la Tierra

P R E S E N T A:

Olivares Salazar Sara Erika



**DIRECTOR DE TESIS:
Dra. Dara Salcedo González
Querétaro, Querétaro 2016**



Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

Índice

- 1. Resumen**
 - 2. Introducción**
 - 3. Objetivos**
 - 3.1 *Objetivo General*
 - 3.2 *Objetivos Particulares*
 - 4. Marco Teórico**
 - 4.1 *Contaminación y calidad del aire*
 - 4.2 *Contaminantes Criterio*
 - 4.2.1 *Dióxido de azufre*
 - 4.2.2 *Monóxido de carbono*
 - 4.2.3 *Ozono*
 - 4.2.4 *Óxidos de nitrógeno*
 - 4.2.5 *Material particulado*
 - 4.3 *Normatividad Oficial en materia de calidad del aire*
 - 4.4 *Variables meteorológicas y contaminación del aire*
 - 4.5 *Equipos de monitoreo de calidad del aire*
 - 5. Sitio de estudio**
 - 5.1 *Sistema de monitoreo automático*
 - 5.2 *Equipos de monitoreo de calidad del aire*
 - 6. Materiales y métodos**
 - 6.1 *Datos de calidad del aire*
 - 6.2 *Análisis de datos de calidad del aire*
 - 6.3 *Análisis de datos meteorológicos*
 - 7. Resultados**
 - 7.1 *Calidad del aire*
 - 7.2 *Cumplimiento de la normatividad oficial mexicana*
 - 7.3 *Comportamiento temporal de los contaminantes criterio*
 - 7.3.1 *Ciclos diurnos*
 - 7.3.2 *Ciclos semanales*
 - 7.3.3 *Comportamiento mensual*
 - 7.4 *Comportamiento temporal de las variables meteorológicas*
 - 7.4.1 *Radiación Solar*
 - 7.4.2 *Precipitación*
 - 7.4.3 *Dirección y velocidad del viento*
 - 7.4.4 *Humedad Relativa*
 - 7.4.5 *Temperatura*
 - 7.5 *Asociación variables meteorológicas y concentración de contaminantes criterio*
 - 8. Discusión**
 - 9. Conclusiones**
 - 10. Recomendaciones**
- Anexos**
- Bibliografía**

Agradecimientos

A la Dirección General Asuntos del Personal Académico de la UNAM (DGAPA), por el apoyo económico brindado durante el desarrollo de este estudio; mediante el proyecto IA100514.

A la Secretaría de Desarrollo Sustentable (SEDESU) por brindarnos los datos de calidad del aire con los que fue posible realizar este trabajo.

Al Licenciado en Tecnología Ricardo Nieto Fuentes, por la realización del programa “weatheranalysis”, el cual facilitó el manejo de los datos meteorológicos.

A la Dra. Dara Salcedo, por la guía y apoyo que me brindó durante la realización del proyecto.

Al Dr. Adolfo Magaldi, por su ayuda en la revisión del trabajo escrito y el desarrollo del esquema estadístico utilizado en este trabajo.

Al comité que conforma el jurado de revisor del escrito:

Presidente: *Dr. Manuel Miranda Anaya*

Suplente: *Dr. Harry Álvarez Ospina*

Suplente: *M. en C. Elizabeth Fuentes Romero*

Por la ayuda brindada durante la realización y revisión de este trabajo de investigación.

Dedicatoria

A MIS PADRES:

Por el apoyo, los sacrificios, la confianza y los consejos que me brindaron durante mi formación universitaria. Por compartir conmigo todas las alegrías y tristezas, así como los logros y fracasos que he tenido durante esta etapa. Con mucho cariño y orgullo, para ustedes.

A MIS HERMANAS:

Por ser siempre mi principal motivación.

AL DR. JUAN MARTÍN GÓMEZ Y LA M.C CAROLINA MUÑOZ:

Por todo el apoyo y cariño que he recibido de su parte durante mi formación universitaria. Gracias por los consejos y regaños que me ayudaron a seguir el camino que me trajo a cumplir el primero de muchos objetivos.

A MIS AMIGOS:

Por hacer menos pesada mi estancia en Querétaro. En especial a Xóchitl Tapia, por su apoyo y cariño, además de su complicidad en muchas locuras. Igualmente, a Octavio Romo, por su cariño y apoyo incondicional.

1. Resumen

En la actualidad uno de los principales problemas ambientales en zonas urbanas es la calidad del aire, sobre todo en aquellas que albergan una gran densidad poblacional, ésta es evaluada mediante la medición de la concentración de 5 compuestos clasificados como contaminantes criterio: dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃), monóxido de carbono (CO) y material particulado menor a 10 y 2.5 µm (PM₁₀ y PM_{2.5}, respectivamente). Estos son considerados criterio debido al daño que causan a la salud de la población que se encuentra expuesta a concentraciones elevadas de los mismos, lo que ha llevado a que las autoridades gubernamentales decreten límites máximos permisibles los cuales se establecen dentro de Normas Oficiales Mexicanas.

Las fuentes de emisión de algunos de los contaminantes criterio y sus precursores son principalmente el transporte y la industria, sobre todo en zonas urbanas. Debido a esto y a que durante las últimas décadas, la ciudad de Querétaro ha registrado un crecimiento poblacional acelerado, que se puede relacionar con el incremento del tránsito vehicular, y un incremento en el número de industrias establecidas; en el año 2011, con la colaboración de la Secretaría de Desarrollo Sustentable, se instalaron 5 estaciones automáticas para el monitoreo de la calidad del aire. En el año 2014 se publicó el primer reporte de calidad del aire de la ciudad de Querétaro (SEDESU, 2014). Sin embargo, en éste solo se muestra el resultado del análisis de datos de los años 2011 y 2012, los cuales son limitados en cuanto a cantidad y calidad. Por tal motivo, el presente trabajo tuvo como objetivo procesar las concentraciones de los contaminantes criterio, registradas durante le 2013, y determinar su comportamiento temporal anual en la Ciudad de Querétaro. Esto nos permitió determinar si se encuentran dentro del límite permisible por la normatividad oficial mexicana.

La determinación se llevó a cabo mediante el análisis de los datos de calidad del aire de la Ciudad de Querétaro, registrados durante el año 2013 por las 5 estaciones con las que cuenta la ciudad.

Por otro lado, se muestra el resultado del análisis de datos meteorológicos obtenidos por la Red del Centro de Investigación del Agua Querétaro (RedCIAQ), a partir del cual se obtuvieron las tendencias anuales de variables meteorológicas como precipitación, radiación solar, velocidad y dirección del viento. Finalmente se describe la relación que se observó entre algunas variables meteorológicas y la concentración de los contaminantes criterio; la cual no es clara debido a la mala calidad de los datos de calidad del aire.

2. Introducción

La calidad del aire es evaluada mediante la medición de la concentración de 5 compuestos considerados como contaminantes criterio: dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono (O₃), monóxido de carbono (CO) y material particulado menor a 10 y 2.5 µm (PM₁₀ y PM_{2.5}). Estos contaminantes se consideran criterio debido al daño que causan a la salud de la población que se encuentra expuesta a concentraciones elevadas de los mismos (Manahan, 2007). Esto ha llevado a que las autoridades gubernamentales establezcan límites máximos permisibles dentro de las Normas Oficiales Mexicanas (NOMs).

Cuando la concentración de contaminantes criterio rebasa los límites establecidos en la NOM's nos enfrentamos a una disminución en la calidad del aire. Esto es resultado de la combinación de factores naturales y antrópicos. Los factores antrópicos son las emisiones de contaminantes y sus precursores (compuestos que al sufrir reacciones químicas en la atmósfera forman contaminantes criterio); siendo el transporte y la industria los principales emisores de sustancias tóxicas. Por otro lado, entre los factores naturales de mayor relevancia se encuentran los meteorológicos (precipitación, velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad relativa y presión) y los topográficos, ya que de estos depende el transporte y la dispersión de contaminantes que afecta directamente la distribución temporal y espacial de la concentración de los contaminantes (Lezama, 2010).

Durante los años 80, en la ciudad de México se comenzaron a implementar medidas para el control de la calidad del aire debido a que la concentración de contaminantes en el aire llegó a niveles críticos, representando un problema grave a la salud pública y ecosistémica. A mediados de los 90's se comenzaron a realizar los primeros inventarios de emisiones a la atmósfera en el país. Esto principalmente en los estados de la frontera norte del país, siendo las metrópolis el centro de atención debido a su alta densidad poblacional (Lezama, 2010). Sin embargo, es hasta el año 1999 cuando en el estado de Querétaro se realiza el primer inventario de emisiones a la atmósfera (SEDESU, 2014); el cual se publica hasta el año 2006 como parte del primer Inventario Nacional de Emisiones a la atmósfera. En este inventario se considera al estado de Querétaro como parte del corredor industrial del Bajío (García, 2013).

El estado de Querétaro se localiza en el centro-este del territorio nacional y su capital, Santiago de Querétaro, es considerada una de las ciudades más importantes de la República Mexicana por su ubicación geográfica ya que ha propiciado el desarrollo industrial (SEDESU, 2014).

En los últimos 40 años se ha observado un crecimiento exponencial en el número de habitantes que radican en la ciudad de Querétaro, pasando de 163,063 habitantes en 1970 a 801,940 habitantes en 2010 (INEGI, 2015). Este aumento poblacional se debe principalmente a la oferta de empleos que hay dentro de la ciudad, ya que, existen al menos 8 parques industriales dentro de la misma (SEDESU, 2015). Este crecimiento, ha ocasionado un incremento en el número de vehículos particulares y de transporte público que circulan por la ciudad, lo que resulta relevante ya que, la quema de combustibles fósiles por el transporte e industria es la principal fuente de emisión de contaminantes criterio y/o sus precursores. Todo lo anterior podría resultar en un deterioro de la calidad del aire de la ciudad.

En el año 2011, en Santiago de Quer se instaló una Red de Monitoreo Ambiental (RMA) constituido por 5 estaciones automáticas para el monitoreo de la calidad del aire, las cuales se encuentran bajo la supervisión de la Secretaria de Desarrollo Sustentable (SEDESU, 2014). En el año 2014, se publicó el Programa de Gestión para el Mejoramiento de la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana de Querétaro-San Juan del Rio 2014-2023, el cual incluye un análisis de los datos obtenidos por la RMA durante los años 2011 y 2012. El reporte concluye que la concentración de los contaminantes criterio no rebasa los límites establecidos en las NOMs durante el periodo analizado, es decir, que la ciudad cuenta con una buena calidad del aire (SEDESU, 2014). Sin embargo, esta conclusión es cuestionable debido a que durante este periodo el rendimiento de las estaciones es considerado malo debido al bajo porcentaje de datos registrados (<50%) ;(INECC, 2010B). Considerando que el reporte de la SEDESU el único sobre la calidad del aire en la ciudad de Querétaro, el presente estudio analiza las concentraciones de los contaminantes criterio registradas en las cinco estaciones de calidad del aire con las que cuenta la ciudad para el año 2013. Esto permitió evaluar si los contaminantes criterio se encuentran dentro de los límites permisibles considerados en las Normas Oficiales Mexicanas. Además se describe el comportamiento de la concentración de cada contaminante a diferentes escalas de tiempo; y se establece la relación entre variables meteorológicas, como velocidad y dirección del tiempo, precipitación, temperatura, radiación solar y presión, con la variabilidad temporal y espacial de la concentración de los contaminantes criterio presentes en la atmósfera.

3. Objetivos:

3.1 Objetivo General

Conocer la concentración de los contaminantes criterio y su variabilidad temporal para determinar la calidad del aire en la Ciudad de Querétaro durante el año 2013, utilizando datos del SIMAQ.

3.2 Objetivos Particulares

- Determinar si las concentraciones de contaminantes criterio cumplen con las NOM's durante el 2013.
- Describir la variabilidad en las concentraciones de contaminantes criterio a diferentes escalas de tiempo (diurno, semanal, mensual, estacional y anual).
- Describir la variabilidad espacial y temporal de la concentración de contaminantes criterio, en función de las variables meteorológicas (viento, precipitación, temperatura, humedad relativa, presión y radiación solar).

4. Marco Teórico

4.1 Contaminación y calidad del aire

Se define a los contaminantes del aire como sustancias (sólidos, líquidos o gases) que en concentraciones altas ponen en peligro la salud de los humanos y animales, además de causar daño a la vegetación y el ambiente (Ahrnes, 2009). El alcance de la contaminación atmosférica es muy variable por la distancia de incidencia y por su “formación”. Los episodios de contaminación en grandes ciudades se consideran escala local, es decir, abarca algunos kilómetros cuadrados.

Por su emisión, los contaminantes atmosféricos se clasifican en dos categorías: 1) Primarios son aquellos que son emitidos directamente a la atmósfera por chimeneas o tubos de escape; 2) Secundarios son aquellos que se forman cuando ocurre una reacción química entre los componentes del aire. Los contaminantes secundarios generalmente son producidos por la naturaleza oxidante de la atmósfera (Ahrnes, 2009).

La calidad del aire es un indicador de la concentración de contaminantes que tiene el aire que respiramos (SEDEMA, 2015). La contaminación del aire se ha relacionado con enfermedades pulmonares, cardiovasculares, neuronales y del sistema inmunológico, donde los grupos de riesgo son los infantes y los niños, ya que son los más vulnerables a la neurotoxicidad, debido a la susceptibilidad del cerebro durante los periodos de desarrollo (Levy, 2015). Es por esto que la contaminación atmosférica es un tema de preocupación internacional y se han desarrollado protocolos y acuerdos internacionales con el fin de disminuir la emisión de contaminantes a la atmosfera (SEDEMA, 2015).

4.2 Contaminantes criterio

4.2.1 Dióxido de azufre (SO₂)

El dióxido de azufre es un gas incoloro que a concentraciones mayores a 300 ppb se percibe con un sabor característico, mientras que a concentraciones mayores a 500 ppb cuenta con un olor propio. La principal fuente de emisión de SO₂ es la combustión de compuestos fósiles que contienen azufre. Por lo tanto, plantas generadoras de energía eléctrica, refinerías de petróleo y fábricas de papel, son las principales fuentes de emisión del SO₂ (Jacobson, 2002). Por otro lado, también existen fuentes de emisión naturales como la actividad volcánica o la acción de algunas bacterias y organismos que viven en el océano. Sin embargo, estas emisiones no son significativas en la mayoría de las zonas urbanas (Ahrnes, 2009).

Gran parte del SO₂ emitido a la atmosfera se oxida a ácido sulfúrico (H₂SO₄) y sulfatos (SO₄²⁻). La serie de reacciones que conlleva este proceso son complejas y no lineales. Por ejemplo, se sabe que la presencia de hidrocarburos y NO_x (óxidos de nitrógeno) aumentan la velocidad de oxidación de SO₂. Sin embargo, la variabilidad de otros factores como la temperatura, humedad, radiación solar, dispersión y características de la superficie donde se desarrolla la reacción, influyen en el tipo de reacciones que sufrirá el SO₂. Los tipos de reacciones que experimenta el SO₂ en la atmosfera son: reacciones fotoquímicas, procesos químicos en gotas de agua y reacciones en la superficie de

partículas sólidas. La oxidación del SO₂ en las reacciones que ocurren dentro de gotas de agua son las más importantes, aunque también son las más complicadas de estudiar (Manahan, 2007).

Los productos de la reacción del SO₂ son responsables de la formación de aerosoles y lluvia ácida (SEDEMA, 2015). Por otro lado, el SO₂ puede ser disuelto en gotas de agua, ya que es un gas relativamente soluble, o ser transportado por el viento. Además, también puede ser transferido al suelo y capas de hielo (Jacobson, 2002).

La concentración global de SO₂ en la tropósfera va de 10 ppt¹ a 1 ppb². Mientras que, en zonas urbanas con problemas de contaminación de aire, las concentraciones van de 1 a 30 ppb (Jacobson, 2002).

Los efectos a la salud asociados a este contaminante van desde irritación en las vías respiratorias (SEDEMA, 2015), hasta la muerte de la persona expuesta a concentraciones mayores de 500 ppm (Manahan, 2007). Debido a la solubilidad del SO₂, éste es absorbido en las mucosas de la nariz y el tracto respiratorio, causando irritación. Lo mismo sucede con el H₂SO₄ (ácido sulfúrico) pero su depósito a lo largo del tracto respiratorio depende del tamaño del aerosol en el cual este disuelto, teniendo mayores alcances entre más pequeño sea.

Altas concentraciones de SO₂ y H₂SO₄ causan daño a la función pulmonar, provocando contracciones bronquiales y favoreciendo el padecimiento de infecciones respiratorias (Jacobson, 2002). Por otro lado, agrava problemas respiratorios preexistentes, tales como asma, bronquitis y enfisemas (Ahrnes, 2009). Estudios epidemiológicos recientes, relacionan la exposición a altas concentraciones de SO₂ con el incremento en la morbilidad de cáncer de pulmón. Además se sabe que uno de los principales efectos fisiológicos del SO₂ es la afectación a la función cardiaca (Wang, Du, & Cui, 2014).

4.2.2 Monóxido de carbono (CO)

Gas incoloro, insípido, inodoro y no es irritante, por lo tanto, es imperceptible en el aire que respiramos (Levy, 2015). Es considerado el contaminante primario más abundante dentro del aire de la ciudad (Ahrnes, 2009). El monóxido de carbono no se cataloga como un gas de efecto invernadero. Sin embargo, su emisión y oxidación a CO₂ ($2 CO + O_2 \rightarrow 2CO_2$) afectan el clima global (Jacobson, 2002).

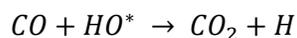
El monóxido de carbono se forma durante la combustión incompleta de material orgánico (SEDEMA, 2015). La principal fuente de emisión antropogénica del CO es la combustión incompleta de gasolina y/o diésel utilizado por los medios de transporte, principalmente los vehículos (Ahrnes, 2009). En consecuencia, las concentraciones más altas tienden a ocurrir en áreas urbanas congestionadas; donde los niveles pueden variar entre los 50 y 100 ppm (Manahan, 2007). Otras fuentes de emisión son la quema de biomasa, algunos procesos industriales y la actividad biológica. Por otro lado, también existen fuentes de emisión menores, tales como calentadores de agua y estufas de gas y carbón. Estas fuentes contaminan el aire dentro de lugares cerrados como casas (Jacobson, 2002).

La concentración global de CO varía entre los 50 y 120 ppb en la tropósfera y se estima que aproximadamente el 60% de estos niveles se atribuyen a actividades antrópicas (Levy, 2015).

El principal sumidero del CO atmosférico es su oxidación a CO₂. Esto sucede cuando el CO reacciona con un radical hidroxilo (Jacobson, 2002):

¹ PPT= Partes por trillón

² PPB=Partes por billón



Por otro lado, también puede ser depositado en el suelo o en capas de hielo; además puede ser diluido en agua oceánica (Jacobson, 2002). Sin embargo, en zonas urbanas los principales procesos que disminuyen la concentración de CO en la atmósfera son la oxidación del mismo y la dispersión causada por el viento. De tal manera que los niveles atmosféricos de CO tienen una correlación positiva con la densidad del tráfico vehicular y una correlación negativa con la velocidad del viento (Manahan, 2007).

Los efectos a la salud asociados con la exposición a CO van desde afectaciones cardiovasculares y neuroconductuales, como resultado de la exposición a bajas concentraciones, hasta la inconsciencia y la muerte después de una exposición aguda o crónica a altas concentraciones de CO (Raub, Mathieu-Nolf, Hampson, & Thom, 2000).

Cuando se respira CO, éste es absorbido por los pulmones y llega al torrente sanguíneo (Raub et al., 2000). A continuación el CO, se une a la hemoglobina (Hb) (proteína que tiene la función de captar el oxígeno de los alveolos pulmonares y transportarlo a los tejidos) para formar **carboxihemoglobina (COHb)**. Debido a que la afinidad de la Hb con el CO es 240 veces mayor comparada con la afinidad por el oxígeno, altos niveles de COHb resultan en una disminución del aporte de oxígeno a los tejidos. La toxicidad del CO se manifiesta cuando la COHb aparece en una proporción mayor al 10%. Sin embargo, no es la formación de COHb el principal mecanismo de toxicidad, sino la acumulación de CO dentro de los tejidos.

Algunas manifestaciones de toxicidad aguda por CO son: hipotensión (presión sanguínea baja), arritmia (alteración en la frecuencia cardiaca) e isquemia (disminución de la circulación de sangre en una zona específica). Por otro lado, los efectos neurológicos van desde un dolor de cabeza, mareos, pérdida de juicio, confusión, pérdida del conocimiento y convulsiones hasta un derrame cerebral o incluso la muerte. La toxicidad del CO está en función del tiempo y concentración de exposición, siendo los órganos con mayor actividad aeróbica (corazón y cerebro) los más vulnerables.

El sector de la población más vulnerable ante episodios de elevada concentración de CO, son los niños y mujeres embarazadas. Se sabe el CO puede “atravesar” la placenta e interferir en numerosos procesos del desarrollo del cerebro del feto (Levy, 2015).

4.2.3 Ozono (O₃)

Gas incoloro de olor irritante. Es el mayor componente del smog fotoquímico (Ahrnes, 2009). Es un poderoso oxidante y reacciona fácilmente con cualquier compuesto o superficie. Se considera un contaminante secundario, ya que se forma partir de reacciones fotoquímicas dentro de la tropósfera, en las que se involucran óxidos de nitrógeno (NO_x), compuestos orgánicos volátiles (COV) (emitidos principalmente por procesos industriales) y radiación solar (SEDEMA, 2015). Por esto, la formación de ozono troposférico depende de la relación entre la concentración de NO_x y COV (Galán & Fernandez, 2006). Las siguientes reacciones (Ilustración 1) constituyen el ciclo catalítico en la fase gas, durante el cual se forman radicales libres que favorecen la formación de ozono. El ozono troposférico se forma mediante la reacción de una molécula diatómica de oxígeno y un átomo del mismo elemento (reacción 2). La formación del átomo de oxígeno es resultado de la

disociación fotoquímica del NO_2 (reacción 1); el cual es generado durante las reacciones 4 y 5, en donde intervienen los COV's (Villarejo, 2016).

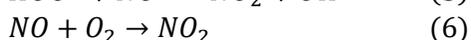
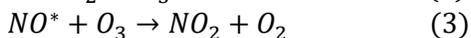
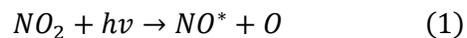


Ilustración 1. Muestra el ciclo de reacciones que dan pie a la formación de ozono troposférico.

La formación de O_3 ocurre únicamente durante las horas del día y los picos de máxima concentración se dan durante la tarde después en días calurosos y con poco viento (Ahrnes, 2009). Por otro lado, en escala anual, las concentraciones más altas de O_3 se registran durante los meses de verano (en ambos hemisferios) (Grandjean, 1976). La concentración de O_3 troposférico global varía entre 20 y 40 ppb; mientras que zonas urbanas la concentración va de 11 a 500 ppb (Jacobson, 2002).

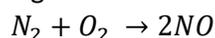
El principal sumidero del ozono es la reacción de éste con el NO_2 : $\text{NO}_2 + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_3 + \text{O}_2$, la cual se lleva a cabo durante la ausencia de radiación solar. Sin embargo, con las primeras horas de luz solar se reinicia el ciclo de formación de ozono (Galán & Fernandez, 2006). Por otro lado, existen otros procesos que influyen en la concentración del ozono, tales como la transferencia del mismo al suelo o capas de hielo, además de la dispersión del contaminante por acción del viento (Jacobson, 2002).

Los efectos a la salud asociados a la exposición de altas concentraciones de ozono van desde irritación ocular y vías respiratorias hasta una disminución de la función pulmonar (SEDEMA, 2015). La exposición a ozono hace a las personas más susceptibles a padecer enfermedades respiratorias, esto como resultado de la inflamación de los pulmones. Además, provoca el agravamiento de padecimientos preexistentes como el asma, bronquitis crónica o enfisema (Ahrnes, 2009). Los efectos causados dependen del tiempo y concentración a la que se esté expuesto. Por ejemplo, a concentraciones mayores de 150 ppb, las personas padecen un intenso dolor de cabeza. Mientras que, a concentraciones mayores de 300 ppb las personas experimentan dolor en el pecho, dificultad para respirar y tos (Jacobson, 2002). La exposición prolongada a bajas concentraciones de O_3 representa la posibilidad de cambios irreversibles en la estructura pulmonar, lo que conduce al envejecimiento prematuro de los pulmones (Ahrnes, 2009). El sector de la población más vulnerable corresponde a las personas que realizan actividades al aire libre, como ejercicio (SEDEMA, 2015).

4.2.4 Óxidos de nitrógeno (NO_x)

Aunque únicamente el dióxido de nitrógeno (NO_2) es considerado un contaminante criterio, éste tiene una íntima relación con el monóxido de nitrógeno (NO). Por lo que en esta sección se describirán ambos contaminantes.

El NO es un contaminante primario, gas incoloro e indoloro (Jacobson, 2002). Se forma cuando el nitrógeno del aire (N_2) reacciona con el oxígeno molecular (O_2):

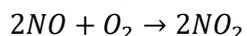


Sin embargo, debido a la alta estabilidad del N_2 , esta reacción sucede únicamente a altas temperaturas. Por lo que durante los procesos de combustión o quema de biomasa se generan las condiciones adecuadas para que ésta reacción se lleve a cabo (Ahrnes, 2009). Por otro lado, el NO también es emitido durante el proceso de des-nitrificación por microorganismos del suelo y plantas; pero esta fuente no resulta relevante en zonas urbanas.

La concentración de NO en la tropósfera global es de alrededor de 5 ppt. Por otro lado, en zonas urbanas la concentración puede alcanzar 100 ppm por la mañana (Jacobson, 2002).

Las afectaciones a la salud del NO son similares a las provocadas por la exposición al CO. El NO se adhiere a la hemoglobina y reduce la eficiencia del transporte de oxígeno a los tejidos del organismo. Sin embargo, ya que las concentraciones de CO son más altas que las del NO, este efecto se considera poco relevante (Manahan, 2007). El único sumidero de este contaminante es su oxidación a NO_2 (Jacobson, 2002).

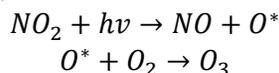
El NO_2 absorbe longitudes de onda corta, por lo que tiene un color café. Además, se caracteriza por tener un fuerte olor característico (Jacobson, 2002). El NO_2 puede considerarse como un contaminante primario, cuando es producto de la oxidación del nitrógeno atmosférico durante la combustión. También se considera un contaminante secundario, cuando es el producto de la oxidación en la atmósfera del NO (SEDEMA, 2015), mediante la siguiente reacción:



La velocidad de esta reacción es dependiente de la concentración de NO. Por lo tanto, a altas concentraciones de NO, la velocidad de conversión a NO_2 es muy alta. Sin embargo, bajo condiciones atmosféricas normales la reacción entre NO y O_3 es la vía principal de producción de NO_2 .



Durante las horas diurnas el NO_2 sufre una reacción fotoquímica que da como resultado la reconversión a NO, lo que favorece la formación de ozono, mediante el siguiente conjunto de reacciones (Galán & Fernandez, 2006):



Bajo la luz del sol la vida media del NO_2 es mucho más corta que la de cualquier otra especie molecular atmosférica. Por esto, se considera que el NO_2 es el intermediario entre la emisión del NO y la formación del O_3 (Manahan, 2007).

La concentración de NO_2 en zonas urbanas va de 100 a 250 ppb (Jacobson, 2002). Aunque ésta se ve afectada por factores como intensidad de luz solar, emisión de contaminantes y temperatura; ya que éstos influyen en la velocidad de formación de NO_2 (Galán & Fernandez, 2006).

Algunos sumideros del NO_2 atmosférico implican la reacción de éste con radicales OH, lo cual permite la formación de ácido nítrico (HNO_3), ácido peroxinítrico (HO_2NO_2) y ácido nitroso (HONO); (Galán & Fernandez, 2006). Estos ácidos, con excepción del HONO que reacciona rápidamente con la luz solar, pueden diluirse en gotas de agua y ser removidos de la atmósfera mediante precipitación ácida (Ahrnes, 2009). Por otro lado, la reacción del NO_2 con radicales orgánicos (RO_2), permite la formación de nitratos orgánicos (Galán & Fernandez, 2006). Además de reaccionar en la atmósfera, el NO_2 también puede ser trasferido al suelo o capas de hielo. Sin embargo, este no es un sumidero relevante en zonas urbanas (Jacobson, 2002).

Los efectos a la salud asociadas con la exposición a altas concentraciones de NO₂ van desde un incremento a la susceptibilidad de padecer enfermedades respiratorias (Jacobson, 2002), hasta la muerte cuando se está expuesto a concentraciones mayores de 500 ppm (Manahan, 2007). La exposición a concentraciones mayores de 80 ppb se asocia con dolor de garganta y resfriados (Jacobson, 2002). Exponerse a concentraciones de entre 50 y 100 ppm durante una hora o menos, causa inflamación pulmonar. Por otro lado, exposiciones de 150 a 200 ppm conllevan al padecimiento de bronquitis fibrosa (Manahan, 2007). El NO₂ también agrava los problemas respiratorios en personas que padecen asma, aún a bajas concentraciones (SEDEMA, 2015). Por lo tanto, se considera que el sector de la población más susceptible a padecer enfermedades asociadas con altas concentraciones de NO₂, son los niños y personas que padecen asma (Jacobson, 2002).

4.2.5 Material particulado (PM)

Se define al material particulado como una mezcla de material sólido y líquido lo suficientemente pequeño para permanecer suspendido en el aire (Ahrnes, 2009). Los componentes de la mezcla tienen gran diversidad en tamaño, características físicas, propiedades químicas, forma y origen. De manera general, el tamaño de las partículas suspendidas se clasifica en 3 categorías: partículas gruesas, finas y ultra finas (Pope et. al., 2006). El origen del material particulado puede ser natural o antrópico, dependiendo el tamaño de partícula (Katsouyanni, 2011).

Las partículas clasificadas como gruesas tienen un diámetro >2.5 µm. Se derivan de la suspensión o re-suspensión de polvo, suelo u otro material de la corteza terrestre. Actividades económicas como la minería o la agricultura favorecen la emisión de este tamaño de partículas. Por otro lado, también entran en esta clasificación el polen, sales marinas y esporas. El sumidero de este tipo de partícula es la fuerza de gravedad, ya que por su tamaño sedimentan rápidamente (SEDEMA, 2015).

Las partículas finas, tienen un diámetro <2.5 µm, son emitidas principalmente, durante el procesos de combustión en vehículos, industrias generadoras de energía, plantas de cemento, fundidoras y quema de biomasa. También se forman durante la transformación de compuestos primarios emitidos a la atmósfera, como NO₂ y SO₂. El tiempo de vida de estas partículas va desde algunos días hasta semanas. Juegan un papel importante dentro de la química de la atmósfera; ya que su superficie favorece la activación de reacciones químicas, al cumplir la función de catalizador. Además el PM funciona como sitio de nucleación para la condensación del vapor de agua, proceso que representa uno de sus principales sumideros del PM (Manahan, 2007).

Las partículas ultra finas, tienen diámetros <1 µm son el producto de reacciones químicas que se desarrollan dentro de la atmósfera. El tiempo de vida de este tamaño de partícula es muy corto, ya que, en cuestión de horas se coagulan o condensan para formar partículas más grandes, las cuales permanecen más tiempo en la atmósfera y pueden llegar a ser inhaladas por la población (Pope et al., 2006).

Los efectos a la salud causados por la exposición a altas concentraciones de material particulado varían según el tamaño de partícula, ya que entre más pequeñas, alcanzan mayores profundidades dentro del sistema respiratorio.

PM₁₀ (diámetro <10 µm): Este tamaño de partícula puede depositarse desde la laringe hasta la región torácica (SEDEMA, 2015). Los daños a la salud causados por PM₁₀ son: inflamación pulmonar, aceleración de la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (alteración de la velocidad y cantidad

de aire que se respira (OMS, 2013) y el incremento de la vulnerabilidad ante enfermedades respiratorias (Pope *et al.*, 2006).

PM_{2.5} (diámetro <2.5 µm): Las partículas de este tamaño pueden alcanzar la región alveolar de los pulmones, donde tiene lugar el intercambio gaseoso entre el aire y la sangre (SEDEMA, 2015). Los daños a la salud causados por este tamaño de partícula son: incremento de la capacidad de formar coágulos en la sangre (trombosis), reducción de la saturación de oxígeno en la sangre. Además, la exposición a PM_{2.5} disminuye la circulación de la sangre que llega al corazón, lo que causa una afectación a la función cardíaca. Por otro lado, el volumen de los vasos sanguíneos se puede ver modificado y provocar una alteración en la presión arterial (hipertensión); (Pope *et al.*, 2006) .

Durante la última década, se planteó una relación entre la contaminación del aire por material particulado y un incremento en el número de personas que padecen cáncer de pulmón. Según la OMS (Organización Mundial de la Salud), evaluar esta relación es complicado, ya que; existen un gran número de factores a considerar; tales como el consumo o exposición al humo del tabaco y la composición del material particulado (Pope *et al.*, 2006). Sin embargo, en los últimos años la OMS concluyó que la contaminación del aire, particularmente el PM es un agente cancerígeno pulmonar; aunque no se han identificado los componentes asociados a esto (Raaschou-Nielsen *et al.*, 2016); ya que las partículas finas son capaces de absorber contaminantes muy tóxicos, como metales pesados e hidrocarburos (Cachon *et al.*, 2014).

4.3 Normatividad Oficial Mexicana en materia de calidad del aire

Las Normas Oficiales Mexicanas (NOM'S) son regulaciones técnicas de seguimiento obligatorio cuyo fin es reunir las características que deben tener los procesos o servicios cuando estos representan un riesgo para la seguridad pública o dañar la salud humana. Las NOM's deben someterse a revisión cada 5 años a partir de su entrada en vigor (SSA, 2016).

De acuerdo con lo estipulado en el capítulo II de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al ambiente: "Las emisiones de contaminantes a la atmósfera deben ser controladas para asegurar que la calidad del aire es satisfactoria para el bienestar de la población y el equilibrio ecológico". En consecuencia, la secretaría tiene la facultad de expedir NOM'S, con base en los valores máximos permisibles para la salud pública de contaminantes en el ambiente, determinados por la Secretaria de Salud (NOM-022-SSA1, 2010).

Para establecer la concentración máxima a la que la población puede estar expuesta, se consideran dos escenarios diferentes. El primero es la exposición al contaminante durante un periodo de tiempo corto y/o con baja frecuencia (exposición aguda). El segundo escenario, es la exposición al contaminante durante un periodo de tiempo largo o con una mayor frecuencia (exposición crónica). De esta manera se encuentran los efectos a corto y largo plazo (Katsouyanni, 2011).

En la determinación del límite máximo permisible se deben considerar algunas cuestiones económicas, sobre todo las que conciernen a los sectores automotriz e industrial. Por lo que es necesario que las normas oficiales se elaboren en coordinación con la Secretaría de Economía. De esta manera se analizan las posibles repercusiones económicas que tiene el control de emisiones de contaminantes.

Por otro lado, también se consideran las características ambientales de la zona referencia; como el tipo de clima, uso de suelo, variables meteorológicas y relieve. Particularmente, la ley general de equilibrio ecológico, aborda el tema de la capacidad de asimilación de las cuencas atmosféricas. Por lo que es necesario realizar estudios previos sobre la dinámica atmosférica para conocer como ésta influye en la dispersión de contaminantes (LGEEPA, 2015).

Además, se toman en cuenta los límites de concentración establecidos por las organizaciones internacionales, tales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia de protección al Ambiente de los Estados Unidos de América (EPA, por sus siglas en ingles). Las tablas 1 y 2 en la sección A del anexo contienen los límites establecidos para cada contaminante por ambas organizaciones.

Con base a los parámetros antes mencionados, la Secretaria de Salud emite y publica dentro del diario de la federación las normas oficiales en materia de calidad del aire. En la Tabla 1 se muestran los límites actuales establecidos por esta secretaria para cada uno de los contaminantes criterio (SSA, 2016).

Tabla 1 Límites de concentración establecidos por la Secretaria de Salud, para cada uno de los contaminantes criterio y la norma que lo enuncian.

| Contaminante | Clave NOM | Especificaciones |
|------------------------------------|---|---|
| Ozono | <i>NOM-020-SSA1-2014 (SSA, 2014A)</i> | <i>95 ppb Promedio horario 70 ppb Promedio móvil de 8 horas</i> |
| Dióxido de azufre | <i>NOM-022-SSA1-2010 (SSA,2010)</i> | <i>110 ppb Promedio de 24 horas 200 ppb Promedio móvil de 8 horas 25 ppb Promedio anual</i> |
| Dióxido de nitrógeno | <i>NOM-023-SSA1-1993 (SSA,1994A)</i> | <i>210 ppb Promedio horario</i> |
| Monóxido de carbono | <i>NOM-021-SSA1-1993 (SSA,1994B)</i> | <i>11 ppm Promedio móvil de 8 horas</i> |
| Partículas menores a 10 µm | <i>NOM-025-SSA1-2014 (SSA, 2014B)</i> | <i>75 µg/m³ Promedio de 24 horas 40 µg/m³ Promedio anual</i> |
| Partículas menores a 2.5 µm | <i>NOM-025-SSA1-2014 (SSA, 2014B)</i> | <i>45 µg/m³ Promedio de 24 horas 12 µg/m³ Promedio anual</i> |

4.4 Efecto de las variables meteorológicas sobre la calidad del aire

El principal factor que influye en la concentración de los contaminantes en el aire, es la cantidad que es emitida a la atmósfera. Sin embargo, cuando ocurren episodios de contaminación alta, no necesariamente es consecuencia de un incremento drástico en la emisión. Estos episodios pueden estar asociados a cambios en algunas condiciones atmosféricas, tales como estabilidad y viento. (Ahrnes, 2009).

El transporte y la dispersión de los contaminantes emitidos a la atmósfera, depende en gran medida de parámetros meteorológicos, por lo que resulta imprescindible estudiar la meteorología y sus efectos sobre las fuentes de emisión para planificar actividades relacionadas con el control de calidad del aire (Hernández, 2007).

A continuación se describen las variables meteorológicas que afectan la concentración de contaminantes en el aire.

Estabilidad atmosférica: Puede clasificarse en estable, condicionalmente estable, neutra, condicionalmente inestable o inestable (Hernández, 2007). La clasificación depende de la diferencia de temperatura entre una parcela de aire (gradiente adiabático) y el aire que lo rodea (gradiente ambiental), lo que puede causar el movimiento vertical de la parcela. El gradiente ambiental, es decir, el cambio de temperatura con respecto a la altitud del aire ambiental, no tiene un valor fijo. Mientras que el gradiente adiabático de una parcela de aire ascendente (no existe intercambio de calor entre la parcela y el ambiente) varía según su contenido de agua (seca: 10 C°/km y húmeda: 5°C/km) (OPS/OMS, 2005).

- **Atmósfera inestable:** En este caso, el gradiente ambiental es mayor que el gradiente de la parcela, ya sea seco o húmedo, de tal modo que la masa de aire que se eleva es más cálida que el aire que la rodea lo que favorece que ascienda. La inestabilidad atmosférica se produce comúnmente durante días soleados con vientos a bajas velocidades (OPS/OMS, 2005). Cuando se presenta esta condición la razón de mezcla vertical es mayor, por lo tanto la dispersión de contaminantes es mayor (Ahrnes, 2009).
- **Atmósfera estable:** En este caso el gradiente ambiental es menor que el gradiente adiabático (seco o húmedo) y no existe un movimiento convectivo porque la masa de aire es más fría y más densa que el aire que la rodea. Las condiciones de estabilidad generalmente se producen durante la noche, cuando no hay radiación y los vientos son escasos o nulos (OPS/OMS, 2005). Bajo una atmósfera estable, los movimientos convectivos son pocos o nulos, por lo que no existe una dilución considerable de contaminantes (Ahrnes, 2009).
- **Atmósfera neutra:** El gradiente ambiental es igual al gradiente adiabático (seco u húmedo). Esta condición no favorece ni inhibe los movimientos convectivos. Se produce durante los días con viento a altas velocidades o cuando una capa de nubes impide la entrada de radiación solar que pueda calentar o enfriar la superficie terrestre (OPS/OMS, 2005).

La estabilidad atmosférica determina la extensión vertical de los movimientos convectivos; a mayor extensión, mayor dilución de los contaminantes (Ahrnes, 2009).

La presencia de una capa de inversión puede funcionar como una barrera que evita los movimientos convectivos en la atmósfera (Hernández, 2007). La capa de inversión se genera cuando la temperatura del aire aumenta con la altura, lo cual inhibe la dispersión vertical de los contaminantes y puede generar episodios de alta contaminación en la atmósfera. (OPS/OMS, 2005).

Altura de capa de mezcla:

La tropósfera tiene una extensión aproximada de 11 km de altura. Sin embargo, únicamente los primeros kilómetros sufren de una influencia directa por parte de la superficie terrestre. A esta parte de la tropósfera se le denomina capa límite y procesos como la evaporación, transpiración, emisión de contaminantes, turbulencia y modificación del flujo debido al terreno, pueden cambiar sus características en cuestión de horas. Debido a cambios en la temperatura o tipo de suelo, la capa límite tiene un espesor variable en tiempo y espacio; puede ir de cientos de metros a pocos kilómetros (Stull, 1988).

Dentro de la capa límite se encuentra la capa de mezcla. Esta se define como la capa de la atmósfera adyacente al suelo dentro de la cual cualquier contaminante emitido es dispersado verticalmente por convección o turbulencia, en una escala de tiempo de aproximadamente una hora (Wagner & Schäfer, 2015). La profundidad de esta capa varía temporalmente, debido a que se ve afectada por factores como la estabilidad atmosférica, la radiación solar, la velocidad del viento y el tipo de terreno (Moragues, 2016). La altura de la parte superior de esta capa se conoce como altura de la capa mezcla y determina el alcance vertical de los procesos de dispersión de contaminantes (Hernández, 2007). La capa de mezcla alcanza su máxima profundidad durante las tardes (Hidalgo, 2016). Esto debido a que la cantidad de radiación que llega a la superficie terrestre es mayor, provocando un aumento de temperatura de ésta y de las masas de aire circundantes; la cual disminuye con la altura generando una atmósfera inestable (Rodríguez Valdéz, et.al, 2015). Mientras más profunda sea la capa de mezcla, mayor será el volumen de aire disponible para la dispersión de los contaminantes (Moragues, 2016).

Temperatura: En estudios de contaminación del aire es importante considerar esta variable, tanto a nivel superficie como su variación con la altura dentro de la atmósfera. Como se mencionó anteriormente, estos datos son de utilidad para determinar la posible elevación que tendrá una pluma de contaminación; así como la estabilidad atmosférica (Hernández, 2007).

Velocidad y dirección del viento: Los contaminantes, además de que se pueden dispersar verticalmente lo hacen de forma horizontal, debido a la influencia de los vientos superficiales.

El viento es una cantidad vectorial. La velocidad es la magnitud del vector, mientras que la dirección es su orientación (Hernández, 2007).

- **Velocidad:** A mayor velocidad del viento existe una mayor dispersión de contaminantes, debido a que recorren una mayor distancia en menos tiempo. Cuando el viento es más fuerte también hay una mezcla más rápida con el aire de alrededor, lo que también favorece la dilución de los contaminantes (Ahrnes, 2009). Por otro lado, a medida que la velocidad del viento aumenta, la elevación de una pluma de contaminación (fuente puntual) disminuye, ya que, es deformada por el viento. Esta situación puede generar un problema de contaminación a distancias cortas del punto de emisión

- **Dirección:** Se define como la orientación del vector viento con respecto a la horizontal. Se mide en grados en dirección de las agujas del reloj, siendo 0° el norte y se refiere a la dirección desde la cual sopla el viento. Esta componente del vector determina la dirección de transporte de la contaminación (Hernández, 2007).

Nubosidad: Tiene dos efectos principales: el primero es que reduce la transmisión de radiación UV, lo que causa una disminución en las reacciones fotoquímicas que favorecen la formación de contaminantes secundarios como el ozono; el segundo efecto es que los contaminantes se pueden disolver en las nubes para posteriormente ser precipitados; o por el contrario, regresar al aire cuando el agua se evapora (Jacobson, 2002).

Precipitación: La formación de lluvia ayuda a la limpieza de la atmósfera (Jacobson, 2002). Al oxidarse los NO_x y el SO₂ y mezclarse con agua se forman ácidos que posteriormente son depositados en la superficie mediante lluvia. La lluvia se considera ácida cuando tiene un pH³ menor o igual a 5 (Ahrnes, 2009). Por otro lado, la precipitación disminuye la concentración de material particulado en la atmósfera. Las partículas con diámetros menores a 10 micrómetros sirven como núcleos de condensación para el vapor de agua concentrado en la atmósfera.

Orografía/ Relieve: Las condiciones del terreno pueden afectar la dispersión de los contaminantes. Por ejemplo, si se tiene un terreno plano, los contaminantes pueden ser transportados a una mayor distancia. Por el contrario, si el terreno es sinuoso o con grandes montañas, éstas servirán como barrera natural para el flujo del aire, lo que ocasiona un aumento en la concentración de los contaminantes (Hernández, 2007).

³ pH= Concentración de iones hidrógeno. Indica el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa.

4.5 Equipos de monitoreo

Las estaciones de monitoreo que se localizan en el área de estudio, cuentan con equipos de la marca **AIRPOINTER** (Wiener Neudorf, Austria), los cuales no están reconocidos por la EPA como equipos adecuados para el monitoreo de la calidad del aire. Sin embargo, algunos de los métodos que utilizan para medir la concentración de los contaminantes criterio sí lo están (EPA, 2016). Por otro lado, en México no se tienen establecidos equipos específicos para el monitoreo de la calidad del aire, únicamente se normalizan las técnicas de medición. A continuación se describe la técnica de mediación utilizada para cada contaminante.

Fotometría ultravioleta para la determinación de ozono: El método consiste en medir la cantidad de radiación UV (254 nm) que absorbe el ozono presente en la muestra analizada. El principio de operación está basado en la Ley de Lambert- Beer, la cual relaciona la absorción de luz con las propiedades del material que ésta atraviesa: “La absorbancia de una muestra a determinada longitud de onda depende de la cantidad de especie absorbente (contenida en la muestra) con la que la luz se encuentra al pasar por la muestra” (INECC, 2010A). La expresión matemática de esta ley es la siguiente:

$$I = I_0 e^{-\alpha LC}$$

Donde:

I= Intensidad de la luz después de la absorción por ozono

I₀= Intensidad de la luz antes de la absorción por ozono

α= Coeficiente de absorción del ozono a determinada longitud de onda

L= Longitud de la celda o tubo de absorción

C= Concentración del gas absorbente

En la Ilustración 2 se muestra un diagrama de la estructura interna del equipo de monitoreo de O₃. Cuenta con un solo sistema de inducción de muestra, a través del cual la muestra es dividida en dos partes y cada una atraviesa una celda de absorción diferente (rectángulos amarillos). La primera parte de la muestra pasa directamente a la celda, mientras que la segunda atraviesa primero un depurador de ozono (recuadro azul) generando así un blanco de referencia. Ambas celdas son irradiadas con radiación ultravioleta generada por una lámpara de vapor de mercurio (circulo amarillo), la cual cuenta con un filtro de longitud de onda menor a 254 nm. Cada celda cuenta con un detector al final (zona roja de la celda), que mide la intensidad de radiación no absorbida. La concentración de ozono en la muestra de aire es proporcional a la diferencia entre la intensidad de radiación medida por los detectores de cada celda (McElroy, 1997).

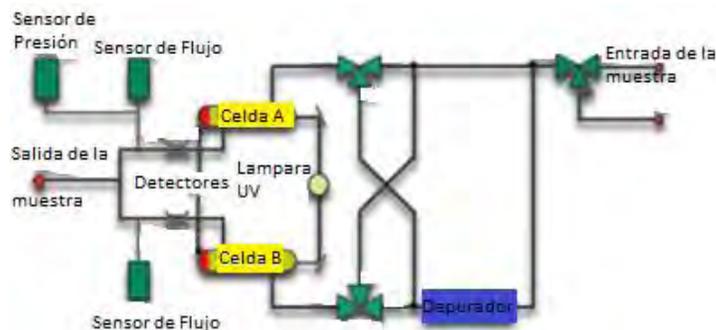


Ilustración 2. Muestra el diagrama de la estructura del equipo de monitoreo de O₃. Modificado de: <https://www.airpointer.com/#sc-tabs-1464112725892>.

Espectrometría infrarroja no dispersiva para la determinación de monóxido de carbono: Esta técnica está basada en la capacidad que tiene el CO para absorber luz infrarroja (Registro Federal, 2011, No. 169). Sin embargo, no solo este compuesto absorbe en el IR, sino también la mayoría de las moléculas heteroatómicas como el CO₂ y vapor de agua, lo cual interfiere en la medición de la concentración de CO (Patier, 2016). Una de las técnicas utilizadas para disminuir dichas interferencias consiste en el uso de un filtro rotatorio dividido en dos celdas, la primera celda está saturada con monóxido de carbono y la segunda con N₂ (INECC, 2010A). Cuando la radiación infrarroja pasa por la celda saturada de CO, antes de interactuar con la muestra que se va a analizar, se obtiene una intensidad de referencia, la cual no puede ser atenuada por la presencia de CO en la muestra, pero si por la concentración de otras moléculas. Por el contrario, la celda saturada de N₂ es invisible a la radiación infrarroja. Por lo que, una vez que la radiación atraviese el filtro de N₂ y posteriormente interactúe con la muestra, la intensidad de radiación se verá influenciada no solo por la presencia de CO sino también por la concentración de las otras moléculas heteroatómicas. La presencia de moléculas heteroatómicas en la muestra de aire produce la misma absorción tanto en los filtros de referencia (CO saturado) como en los de medición (N₂), por lo tanto la diferencia entre la intensidad de radiación medida en los filtros con N₂ y CO es proporcional a la concentración de CO (Themo FisherScientific, 2007).

En la Ilustración 3 se muestra el esquema de un analizador de monóxido de carbono. Los equipos *airpointer* cuentan con un depurador de CO, que se localiza junto al sistema de toma de muestra y tiene como objetivo realizar una calibración del equipo al menos una vez al día. El uso de espejos para dirigir la radiación infrarroja ayuda a que ésta recorra prácticamente toda la celda de muestra y haya una mayor interacción con la muestra de aire. Una vez que la radiación recorrió la celda de muestra es dirigida por un último espejo hacia el detector infrarrojo, donde se cuantifica la intensidad de la misma.

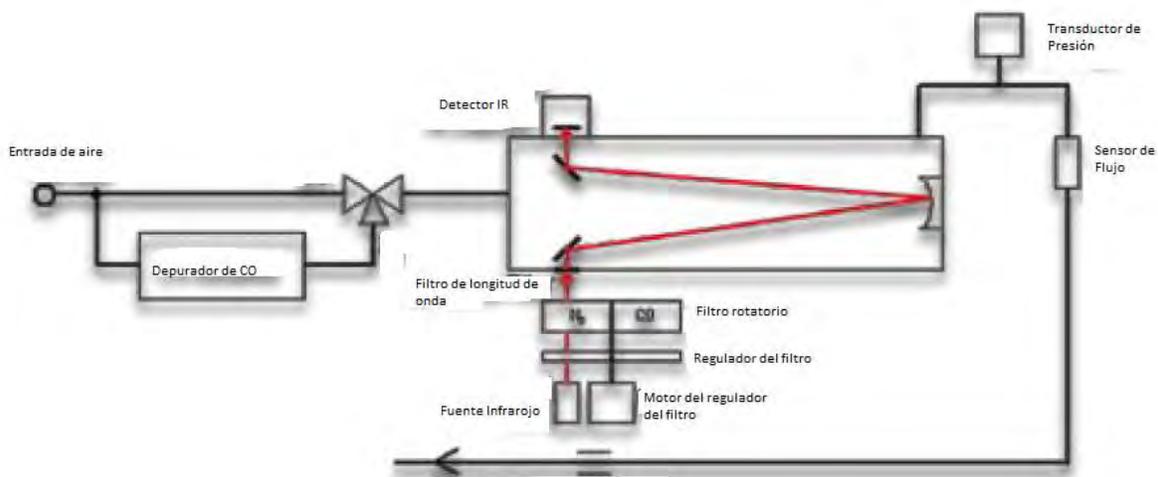
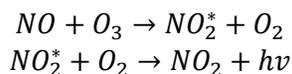


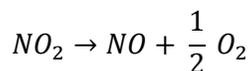
Ilustración 3. Muestra el diagrama de la estructura del analizador de CO
 Recuperado de: <https://www.airpointer.com/#sc-tabs-1464112725892->

Quimioluminiscencia para determinación de óxidos de nitrógeno: Se entiende por quimioluminiscencia al proceso por el cual algunas reacciones químicas además de producir energía en forma de calor, producen luz (Baird, 2001). El uso de esta técnica para determinar la concentración de los óxidos de nitrógeno se divide en dos partes: la primera consiste en la determinación de la concentración de NO, que se calcula gracias a la interacción que tiene con el O₃, a través de las siguientes reacciones.



La reacción del NO con el O₃ produce NO₂ excitado, el cual, al regresar a su estado basal emite radiación con longitud de onda que varía entre los 500 y 3000 nm (INECC, 2010A). La cantidad de radiación emitida es proporcional a la concentración de NO, ya que el O₃ es el reactivo que se encuentra en exceso dentro de la cámara de reacción. El O₃ se genera con un generador de ozono, a partir de la reacción entre O₂ y radiación ultravioleta (Baird, 2001).

La segunda etapa del método consiste en medir la concentración de NO_x en la muestra de aire. Para esto se transforma todo el NO₂ a NO y se repite el análisis de la primera etapa. La transformación de NO₂ a NO se logra mediante la siguiente reacción:



Esta reacción se lleva a cabo utilizando un catalizador metálico caliente que forma parte del equipo de monitoreo (INECC, 2010A).

Ambas etapas de la técnica se desarrollan de forma alterna, por lo que la resta de la concentración obtenida durante la primera etapa (concentración de NO) a la concentración obtenida durante la segunda etapa (concentración de NO_x) es equivalente a la concentración de NO₂ (Baird, 2001).

En la Ilustración 4 se muestra el diagrama de un analizador de NO_x y todos los componentes del equipo de monitoreo: el convertidor de NO₂ a NO, el generador de ozono junto con su fuente de O₂, la cámara de reacción entre el NO y el O₃ y finalmente el filtro detector de la radiación emitida durante la reacción.

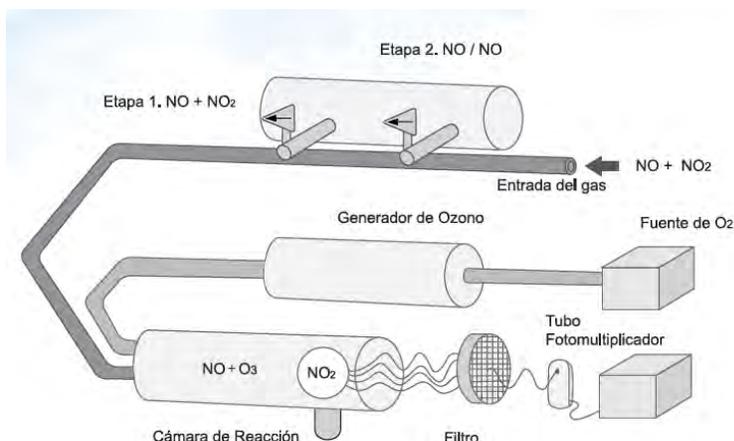
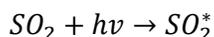


Ilustración 4. Muestra el diagrama de la estructura del analizador de NO_x. Tomada de: *Manuel 3: Redes, estaciones y equipos de medición de calidad del aire*, [imagen], INECC 2010A).

Fluorescencia ultravioleta para determinar dióxido de azufre: esta técnica está basada en el hecho de que las moléculas de SO₂ absorben radiación ultravioleta, en una longitud de onda en un intervalo de entre 200 y 220 nm llegando así a su estado de excitación (Patier, 2016).



Cuando la molécula de SO₂ excitada regresa a su estado basal, emite radiación a una longitud de onda en un intervalo de 240 a 420 nm, la cual es proporcional a la concentración de SO₂ (INECC, 2010A):



Antes de que la muestra de aire pase al analizador de fluorescencia, es necesario que atraviese un filtro para eliminar las interferencias causadas por la presencia de partículas. Además el equipo debe contar con un depurador de hidrocarburos, ya que estos también causan interferencia en la señal obtenida.

En la Ilustración 5 se muestra el esquema de un analizador de dióxido de azufre. El sistema cuenta con un solo sistema de introducción de muestra, un depurador de hidrocarburos, la lámpara que emite radiación ultravioleta, los filtros de longitud de onda y un tubo fotomultiplicador, el cual convierte la radiación emitida por la muestra (una vez que esta fue sometida a la radiación UV), en una señal eléctrica medible.

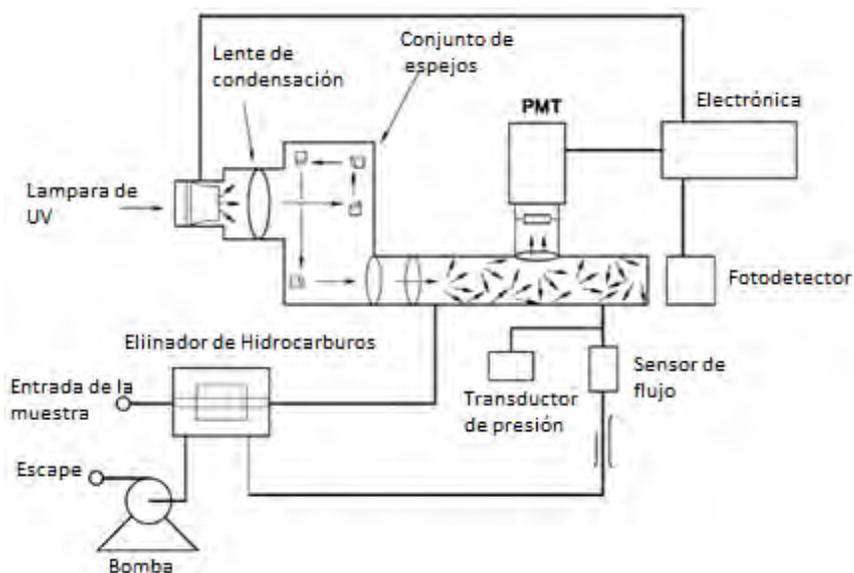


Ilustración 5. Muestra el diagrama de la estructura del analizador de SO₂. Modificada de: <http://www.kultura.ejgv.euskadi.eus/informacion/contaminacion-atmosferica/r46-19123/es/>.

Nefelometría para la determinación del material particulado: Consiste en la medición de la intensidad de la luz dispersada por la presencia de partículas dentro de un fluido, la cual es proporcional a la concentración de las mismas (Hinds, 1998). La técnica está basada en el principio de operación de un fotómetro, el cual se muestra en la Ilustración 6.

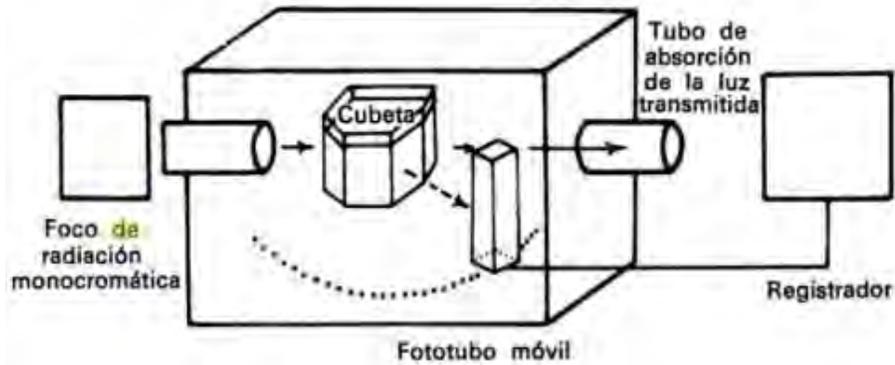


Ilustración 6. Muestra el diagrama del principio de operación de un fotómetro. Recuperada de: Química analítica moderna, [imagen], (Pickering, 1980).

La radiación monocromática es generada por un foco, el cual se encuentra alineado con un conductor óptico (cubeta) de tal manera que los ángulos de la dispersión provocada por la presencia del material particulado dentro de la muestra se encuentre dentro del rango del detector (90° , 45° y menos de 30°) (Hinds, 1998). El detector, casi siempre, es un fotomultiplicador, el cual puede permanecer fijo formando un ángulo determinado con la radiación incidente o estar sobre un disco que permite la medición en varios ángulos. Para reducir el margen de error en la medición las paredes internas del equipo se encuentran pintadas de color negro, lo cual minimiza las reflexiones internas (Pickering, 1980).

En los equipos Airpointer la luz es producida por un LED que genera radiación infrarroja, la cual es dirigida a un preamplificador de sílice (conductor óptico) antes de entrar a la cámara de muestreo. Un factor que genera errores en la estimación de material particulado presente en la muestra es el exceso de humedad, por lo que los equipos cuentan con un calentador, localizado dentro del sistema de inducción de muestra (Airpointer.com, 2016). En la Ilustración 7 se muestra el módulo nefelométrico de los equipos Airpointer.

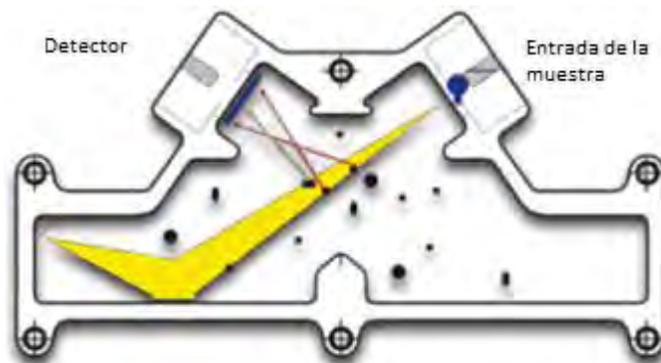
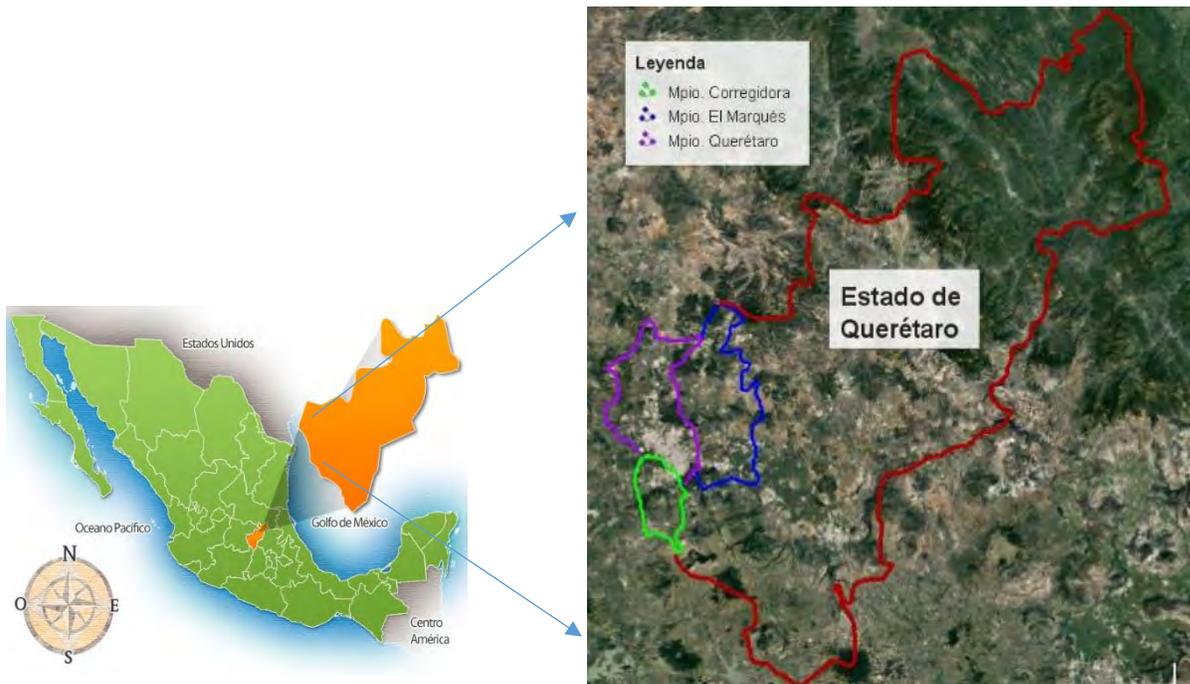


Ilustración 7. Muestra el diagrama de la estructura del analizador de partículas. Modificado de: <https://www.airpointer.com/#sc-tabs-1464112725892>.

5. Sitio de estudio

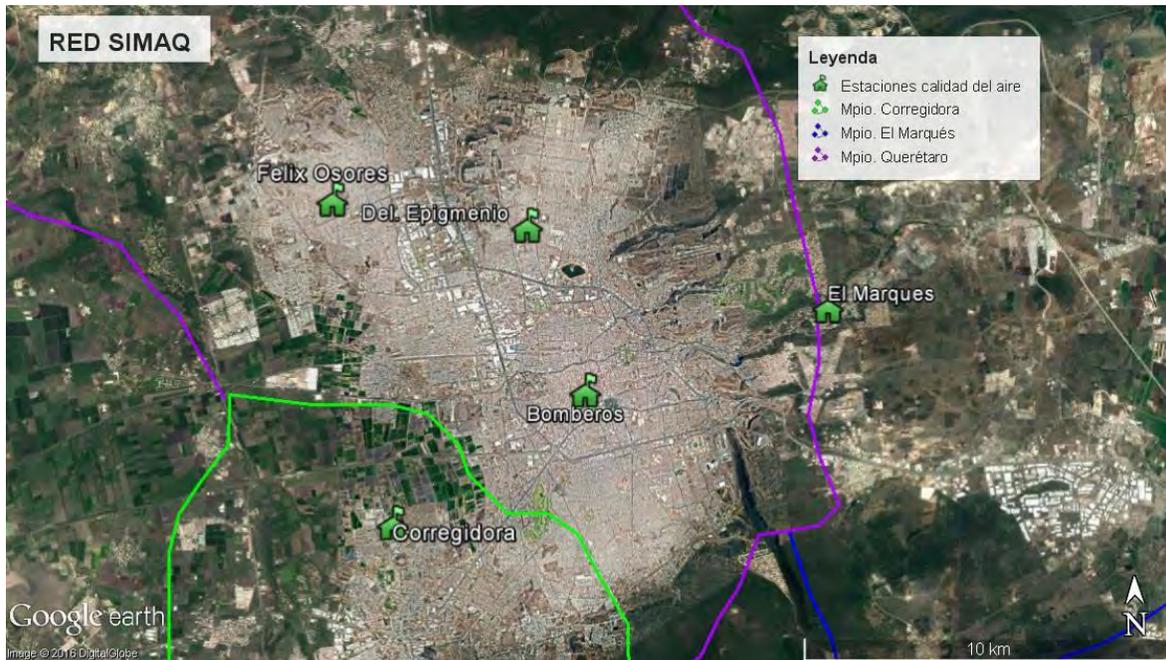
El estado de Querétaro se localiza en el centro-este del territorio nacional; limita al norte con el estado de San Luis Potosí, al este con Hidalgo, al sur con Michoacán, al sureste con el Estado de México y al norte y oeste con Guanajuato. La entidad se encuentra dividida en 18 municipios, siendo su capital Santiago de Querétaro, la cual se ubica al suroeste del territorio estatal y colinda con las localidades El Pueblito y La Cañada, las cuales pertenecen a los municipios de Corregidora y El Marques respectivamente (Mapa 1). Las tres localidades son conocidas como la Zona Metropolitana de Querétaro. Según el Instituto Nacional de Geografía, en el 2010 esta zona albergaba al 60% de la población estatal (SEDESU, 2014).



Mapa 1 Del lado izquierdo muestra la ubicación del estado de Querétaro dentro de la República Mexicana. Del lado derecho se muestra el territorio estatal. El polígono morado corresponde al municipio Santiago de Querétaro, la polígona verde encierra el municipio Corregidora; mientras que el polígono azul abarca el territorio del municipio El Marques. Tomada de Google Earth.

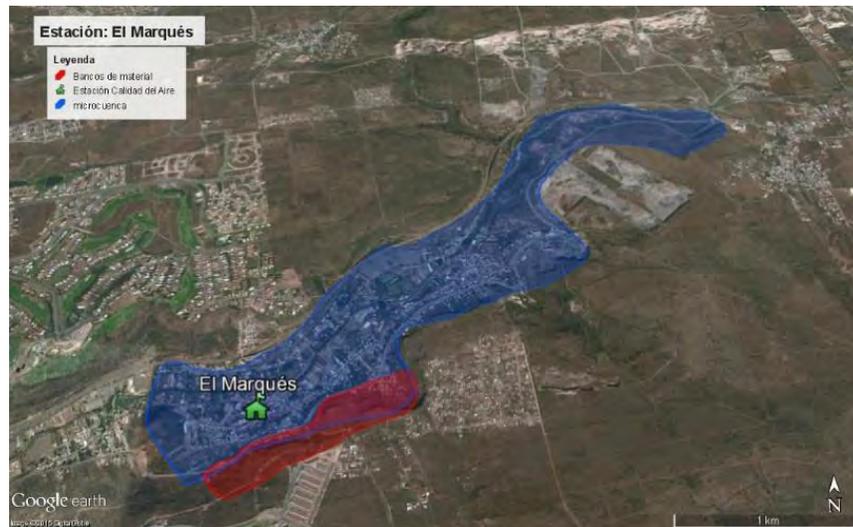
5.1 Sistema de monitoreo automático.

A continuación se describen las 5 estaciones de monitoreo, cuya localización dentro de la zona metropolitana de Querétaro se muestra en el Mapa 2, donde la zona gris representa la mancha urbana, los iconos verdes las estaciones de calidad del aire, la línea morada delimita al municipio Santiago de Querétaro, la línea verde al municipio Corregidora y la línea azul delimita el municipio El Marqués.



Mapa 2.. Ubicación de las estaciones del SIMAQ dentro de la zona metropolitana de Querétaro (iconos verdes). Tomado de Google Earth.

- 5.1.1 Estación El Marqués (Mapa 3): Se localiza en el municipio del mismo nombre, al este de la ciudad de Querétaro. El municipio se encuentra rodeado por la carretera Querétaro-Tequisquiapan, sobre ella se localizan aproximadamente 10 bancos de material para construcción. La ubicación de estos bancos se representa con el polígono rojo dentro del mapa (SCT, 2014). Además, el municipio el Marques se encuentra dentro de una microcuenca hidrográfica de aproximadamente 3 km² de área, la cual fue delimitada a partir de la unión de los puntos de máxima altura entre dos laderas de exposición opuesta (polígono azul).



Mapa 3. Ubicación de la estación El Marqués (marca verde). El polígono azul representa la microcuenca hidrográfica dentro de la que se encuentra el municipio El Marqués. El polígono rojo representa la zona de bancos de material para construcción.

- 5.1.2 La estación Corregidora se encuentra dentro del municipio del mismo nombre, en la orilla Suroeste de la zona urbana de la ciudad de Querétaro (Mapa 4). Ambos municipios están conectados por la avenida Constituyentes (línea amarilla en el Mapa 4), que presenta un tránsito vehicular contaste a lo largo del día, sobre todo por automóviles. Además cerca la estación existen terrenos destinados a la agricultura, los cuales se visualizan dentro del Mapa 4 como porciones de terreno en color verde en forma rectangular.



Mapa 4. Ubicación de la estación Corregidora (marca verde). La línea amarilla representa la Av. Constituyentes

- 5.1.3 La Estación de Bomberos (Mapa 5) se localiza en el centro de la ciudad de Querétaro (polígono color verde), sobre Av. Zaragoza (línea amarilla) que es una de las más transitadas dentro de la ciudad, tanto por automóviles como por transporte público por este punto pasan la mayoría de las rutas de la ciudad, por lo que se considera que el flujo vehicular es constante a lo largo del día.



Mapa 5. Ubicación de la estación Bomberos (marca verde). El polígono verde encierra el área correspondiente al centro del municipio de Santiago de Querétaro. La línea amarilla representa la Av. Zaragoza

- 5.1.4 La estación Félix Osores se ubica al Noroeste de la ciudad dentro de la colonia Cerrito Colorado (Mapa 6), formada principalmente por zonas habitacionales. Se encuentra a aproximadamente a 3 kilómetros del Parque Industrial Benito Juárez (polígono rojo dentro del mapa). Además, se ubica sobre la Av. De la Luz (línea amarilla), que presenta un gran flujo vehicular, sobre todo de automóviles.



Mapa 6. Ubicación de la estación Félix Osores (marca verde). El polígono rojo encierra el área correspondiente a la zona industrial Benito Juárez, mientras que la línea amarilla representa la Av. de la luz

- 5.1.5 La estación Delegación Epigmenio Gonzales se localiza al Este de la ciudad (Mapa 7), dentro de la colonia Desarrollo San Pablo y entre las avenidas Pie de la Cuesta (línea amarilla) y Cerro del Sombrero (línea azul), que presentan un importante tránsito vehicular, tanto de transporte público como de automóviles.



Mapa 7. Ubicación de la Delegación Epigmenio (marca verde). La línea amarilla representa la AV. Pie de la Cuesta, mientras que la línea azul representa la Av. Sombrero

5.2 Equipos de monitoreo de calidad del aire

Las estaciones de monitoreo cuentan con equipos de la marca, que gracias a su tamaño compacto (89 x 78 cm) son fáciles de colocar y transportar. Miden la concentración de los 5 contaminantes criterio, esto mediante métodos establecidos por la EPA (Ilustración 8). Sin embargo, ésta no los reconoce como equipos aptos para el monitoreo de la calidad del aire.

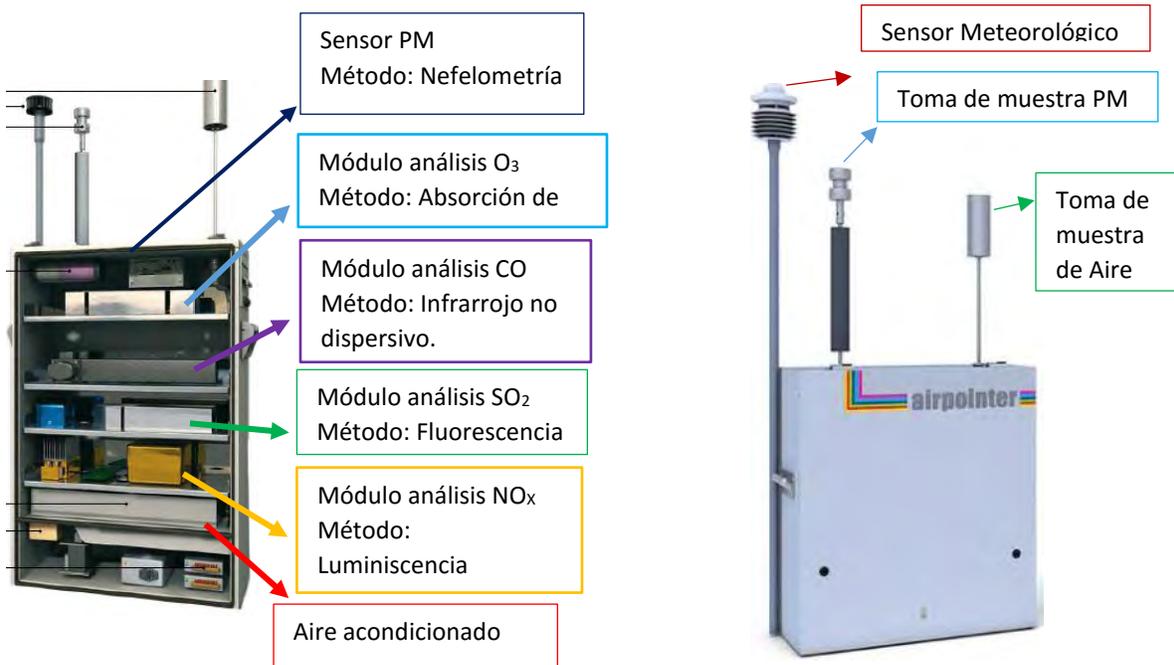


Ilustración 8 Ilustra la estructura de los equipos Airpointer.

Los equipos de medición se encuentran colocados en edificios gubernamentales, lo que en teoría les brinda mayor seguridad y permite un mejor funcionamiento de los mismos, reduciendo la pérdida de datos por fallas técnicas como falta de energía eléctrica.

El Marques: El equipo de monitoreo se encuentra en la azotea de la presidencia del municipio, aunque no en la parte más alta. La caja que contiene los módulos de análisis se colocó a espaldas de una barda, lo cual le brinda protección. Las tomas de muestras fueron adaptadas para darles mayor altura y así la pared no interfiriera con la succión de aire.

Félix Osoreo: El equipo se localiza sobre la azotea del edificio delegacional. Se construyó una pequeña caseta alrededor del equipo con el objetivo de protegerlo, sin embargo no se encuentra completamente cerrada. Las tomas de muestra fueron modificadas para darles mayor altura y fueron colocadas sobre el tejado de la pequeña caseta.

Del Epigmenio: El equipo de monitoreo se encuentra en el edificio delegacional. La caja que contiene los módulos de análisis se encuentra en la parte de atrás del edificio, sirviendo el mismo como protección, la toma de muestra se encuentra sobre la azotea del edificio, por lo que fue necesario modificarlas para darles mayor altura.

Bomberos: El equipo de medición se localiza sobre la azotea de la estación de bomberos de la ciudad. Tiene una pequeña caseta que la protege, el sistema es muy similar al de la estación Félix Osores.

Corregidora: En el año 2013 el equipo de medición se encontraba en el techo de la presidencia municipal. Sin embargo, actualmente no se encuentra en funcionamiento.

6. Materiales y métodos

6.1 Datos de calidad del aire

La Secretaría de Desarrollo Sustentable del estado de Querétaro (SEDESU), cuenta con un Sistema de Monitoreo Automático de calidad del aire de la ciudad de Querétaro (SIMAQ), que consta de 5 estaciones automáticas fijas de monitoreo atmosférico (Mapa 2) (SEDESU, 2014). Específicamente, se monitorea la concentración de los 5 contaminantes criterio: ozono, dióxido de azufre, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno y material particulado menor a 2.5 μm y 10 μm .

Para poder cumplir con los objetivos establecidos en este trabajo era necesario contar con la base de datos generada a partir de los registros de la Red SIMAQ, la cual, como se mencionó anteriormente se encuentra bajo la supervisión de la SEDESU. Por lo tanto, se solicitaron los datos a través de un oficio dirigido al Secretario de Desarrollo Sustentable. En respuesta se recibió un archivo de Excel con los valores de concentración horaria para cada contaminante por cada estación.

6.2 Análisis de datos calidad del aire

6.2.1 Depuración de datos de calidad del aire

Se entiende como depuración de datos a la limpieza de los mismos, en la cual se aplican criterios de forma manual, semiautomática o automática para diferenciar los datos correctos de los falsos o incorrectos. Para poder realizarlo es importante contar con las bitácoras de los equipos de medición, ya que estas nos brindan el registro de fallas en los mismos, cortes de luz y fechas de calibración, lo cual permite identificar los datos que puedan haberse visto afectados por estos sucesos y descartarlos.

En este caso, debido a que no contamos con acceso a las bitácoras de los equipos de medición, la depuración de los datos se realizó con criterios de verificación manual, basados en el conocimiento y experiencia del analista (INECC, 2010B). Para ellos se graficaron los datos horarios obtenidos durante todo el año con el fin de visualizar patrones de comportamiento de los contaminantes fuera de lo normal, e identificar datos con variaciones atípicas.

Cada contaminante registró a lo largo del año un intervalo de concentraciones casi constante. Por lo que, el principal criterio para descartar datos fueron variaciones en dicho intervalo. Por lo tanto, un aumento o disminución en la concentración, que fuera espontáneo y aislado, fue considerado como dato erróneo. El intervalo de concentración varía según el contaminante.

Por otro lado, patrones atípicos en la concentración, como caídas exponenciales o concentraciones muy cercanas a cero, también fueron considerados datos erróneos, por lo tanto fueron descartados.

6.2.2 Análisis de concentraciones y calidad del aire

Con el fin de establecer si las concentraciones de contaminantes registradas por el SIMAQ cumplen con los criterios para determinar la calidad del aire se calcularon promedios en diferentes escalas de tiempo para cada contaminante de acuerdo a las NOM'S.

Promedios horarios: Los datos proporcionados por la SEDESU fueron horarios.

Promedio móvil de ocho horas: Se calcularon a partir de las concentraciones horarias, tomando el dato de la hora seleccionada con las 7 concentraciones registradas en las horas previas. Para que el cálculo sea válido se deben contar con 6 de 8 valores horarios (75% de datos). Este cálculo se realizó para el dióxido de azufre, el monóxido de carbono y el ozono, que son los contaminantes que están normados en esta escala de tiempo.

Promedio de 24 horas: Se calculó a partir de los datos horarios, tomando la última hora del día con las 23 concentraciones registradas previas. Para que el promedio sea válido se debe contar con al menos 18 de los 24 datos horarios (75% de datos). El cálculo se realizó para el dióxido de azufre y el material particulado, ya que son los únicos contaminantes que tienen un límite máximo normado para este periodo de tiempo.

Promedio anual: Se calcula a partir de las concentraciones horarias. Para que el promedio sea válido se debe contar con al menos 6570 datos (75% de datos). El cálculo se realizó para el dióxido de azufre y el material particulado, ya que son los contaminantes que tienen un límite máximo normado en este periodo de tiempo.

6.2.3 Análisis de las variaciones temporales de los contaminantes criterio

Con el fin de obtener una descripción más detallada del comportamiento temporal de los contaminantes criterio en Querétaro, se realizó un análisis a diversas escalas de tiempo:

Ciclo diurno: El objetivo de utilizar esta escala es localizar las horas del día donde se registran las concentraciones máximas y mínimas, con la finalidad de establecer una relación con las fuentes de emisión. Esto principalmente para los contaminantes criterio primarios que son emitidos durante la quema de combustibles fósiles.

Para el cálculo, se clasificaron los datos horarios en 24 grupos, cada uno correspondiente a una hora del día. Posteriormente, para cada grupo, se calculó el promedio, la mediana, los percentiles (25 y 75) y el mínimo y máximo de cada grupo.

Semanal: El objetivo de utilizar esta escala es visualizar si existen diferencias entre las concentraciones observadas durante los fines de semana, con respecto a los días laborales. Para ello, se calcularon los promedios diarios, los cuales se clasificaron según el día de la semana en que se registraron (lunes, martes, etc.). Posteriormente se calcularon promedios para cada día.

Mensual: El objetivo de utilizar esta escala de tiempo es identificar variaciones de las concentraciones de los contaminantes a lo largo del año y tratar de establecer una relación con variaciones en el estado del tiempo. Para el cálculo los datos horarios se clasificaron por mes, para posteriormente calcular un promedio mensual.

Estacional: El objetivo de utilizar esta escala temporal es observar la variación en la concentración de los contaminantes criterio causada por variaciones en el estado del tiempo, tales como precipitación, temperatura o radiación. En este caso el año se dividió en dos periodos: temporada de lluvia y temporada de secas (ver sección de resultados). Entonces, se calculó la concentración promedio de cada contaminante durante cada temporada a partir de los datos horarios.

Todos los cálculos de promedios se realizaron en el software Excel [2013] (Microsoft) y las gráficas se crearon con ayuda del software IGOR Pro [6.3.7] (WaveMetrics, Lake Oswego, OR).

6.3 Análisis de datos meteorológicos

La Universidad Autónoma del Estado de Querétaro (UAQ), en colaboración con otras instituciones educativas y gubernamentales, mantiene desde el 2011 la Red del Centro de Investigación del Agua Querétaro (RedCIAQ), la cual cuenta con 38 estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo de todo el estado, de las cuales 9 se encuentran dentro de la ciudad de Querétaro (Mapa 8). Dichas estaciones monitorean Temperatura, Precipitación, Radiación Solar, Dirección y Velocidad del viento, Humedad, Presión, Intensidad de la lluvia y Punto de rocío.



Mapa 8. Estaciones meteorológicas que se localizan dentro de la ciudad de Querétaro.

6.3.1 Depuración de datos meteorológicos

Recibimos, en diferentes archivos Excel, los datos minútales registrados por 12 estaciones de monitoreo. Con ayuda del programa weatheranalysis [2015] (Nieto, Fuentes), se localizaron saltos en las escalas de tiempo (hora y fecha), así como los periodos de tiempo en donde se contaba con más de un dato para la misma hora. Este tipo de errores fueron corregidos con el fin de tener un continuo de tiempo que nos permitió realizar los cálculos necesarios en Excel de manera automática. El programa weatheranalysis [2015] está escrito en lenguaje Java.

6.3.2 Análisis de la variación temporal de los datos meteorológicos.

Para lograr establecer una asociación entre las variables meteorológicas y la concentración de los contaminantes criterio, se calcularon, bajo los mismos criterios utilizados en el procesamiento de datos de calidad del aire, los siguientes promedios: promedio horario, ciclo diurno y promedio mensual. En el caso de las variables dirección y velocidad del viento, no se realizaron promedios, simplemente con los datos registrados por las estaciones se construyeron rosas de viento en diferentes escalas de tiempo.

Nuevamente, todos los cálculos de promedios se realizaron en el software Excel [2013] (Microsoft) y las gráficas se crearon con ayuda del software IGOR Pro [6.3.7] (WaveMetrics, Lake Oswego, OR).

7. Resultados

7.1 Depuración de los datos

Con base en los criterios descritos en la sección materiales y métodos se descartaron datos de las siguientes estaciones. Los gráficos con los datos horarios de cada contaminante en cada estación se muestran en la sección B de los anexos.

- a) Del Epigmenio: Las concentraciones registradas durante los días 17 de mayo y 6 de septiembre rebasan el intervalo de concentración, en consecuencia ambos días fueron descartados (Ilustración 9).

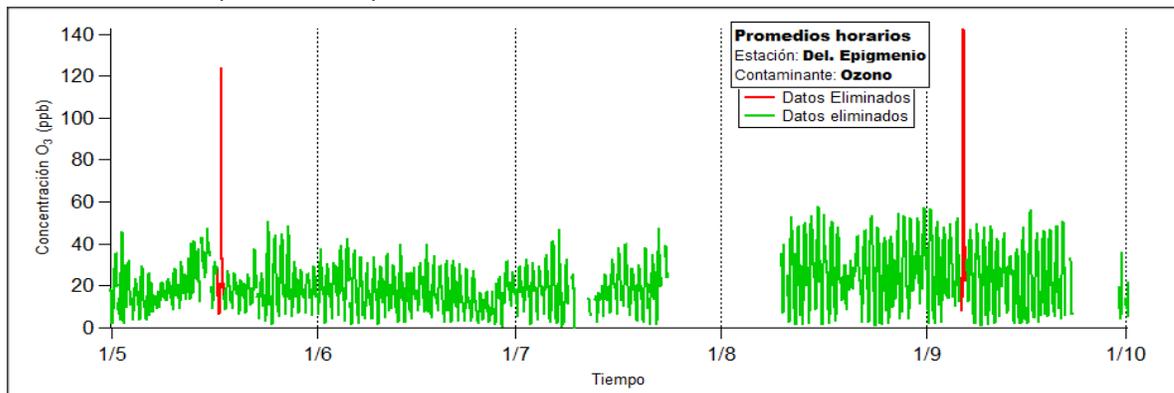


Ilustración 9. Muestra las concentraciones horarias de ozono registradas por la estación Del. Epigmenio, durante el periodo mayo-octubre. En color rojo se muestran los datos descartados.

- b) El Marques: Los datos registrados del 19/05/2013 al 10/08/13 fueron eliminados, ya que, la señal de concentración de ozono disminuyó de 25 ppb hasta casi cero en menos de 24 horas. Además, durante este periodo de tiempo hubo varios intervalos donde la estación no registró concentraciones de ozono y otros donde éstas fueron muy bajas. Este patrón no coincidió con el observado el resto del año Ilustración 10.

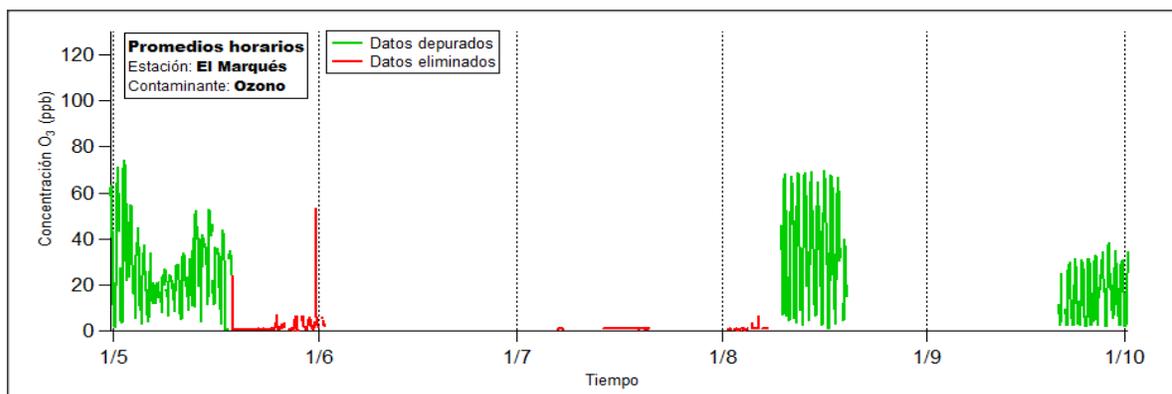


Ilustración 10. Muestra las concentraciones horarias de ozono registradas por la estación El marqués, durante el periodo mayo-octubre. En color rojo se muestran los datos descartados.

c) Bomberos: Dos caídas exponenciales en las concentraciones, las cuales pueden interpretarse como fallas en el equipo de medición, se visualizan entre el mes de agosto y septiembre. La primera se registra a partir del 11/08/13 y hasta 22/08/13 y la segunda abarca del 25/08/13 al 1/09/13 (Ilustración 11). Estos datos no son compatibles con el patrón registrado el resto del año, en consecuencia, fueron eliminados.

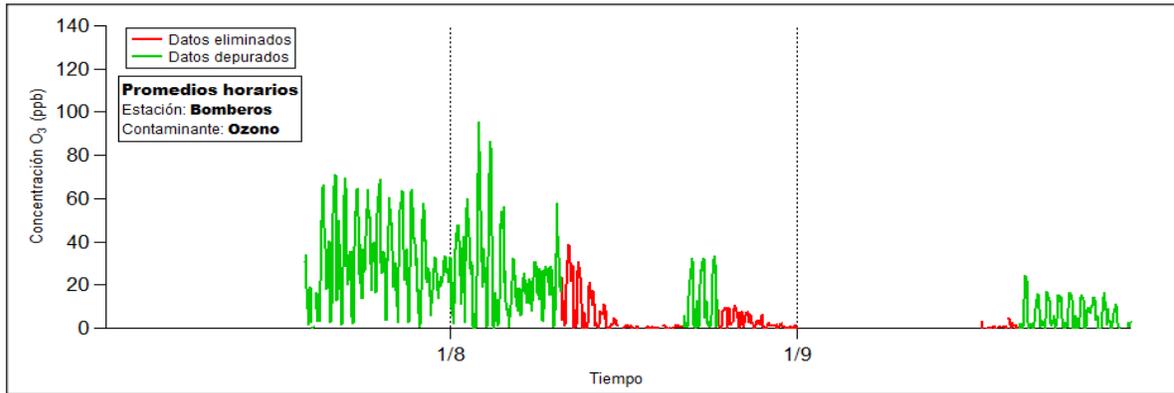


Ilustración 11. Muestra las concentraciones horarias de ozono registradas por la estación Bomberos, durante el periodo agosto-septiembre. En color rojo se muestran los datos descartados.

d) Bomberos: a partir del día 29/06/15, las concentraciones registradas son considerablemente altas, en comparación con las obtenidas el resto del año dentro de la misma estación (Ilustración 12) y con los datos obtenidos por las otras estaciones. Por lo que, estos datos resultan poco confiables y se pueden asociar con fallas en el equipo de medición o una posible calibración del mismo. Sin embargo, al no contar con la bitácora del equipo de medición no es posible corroborar dicha hipótesis, por lo que no es conveniente desechar los datos.

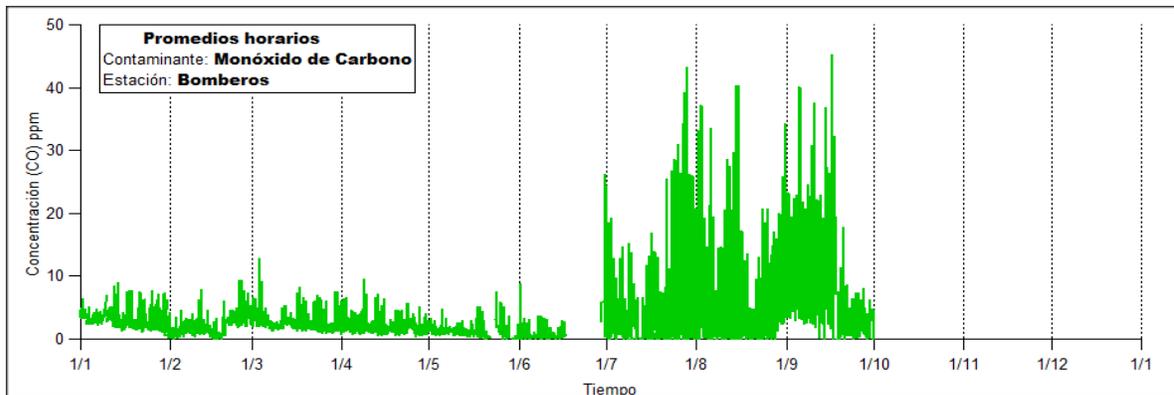


Ilustración 12. Muestra las concentraciones horarias de monóxido de carbono registradas por la estación Bomberos, durante el año 2013. En color rojo se muestran los datos descartados.

- e) Bomberos se descartaron los datos que van del 29/06/2013 al 03/07/2013. En este periodo de tiempo, las concentraciones aumentan y disminuyen de forma discontinua, por lo que suponemos que el equipo de monitoreo estaba fallando. Los datos posteriores a este periodo muestran un comportamiento similar a los que lo anteceden, la diferencia es que hay un cambio de línea base en las concentraciones registradas, que va de menos de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a más de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En consecuencia, las concentraciones son más altas y rebasan el intervalo de concentración que se había registrado. Sin embargo, no se creyó necesario descartar los datos debido a que su patrón de comportamiento es similar a los datos registrados a principio de año (Ilustración 13).

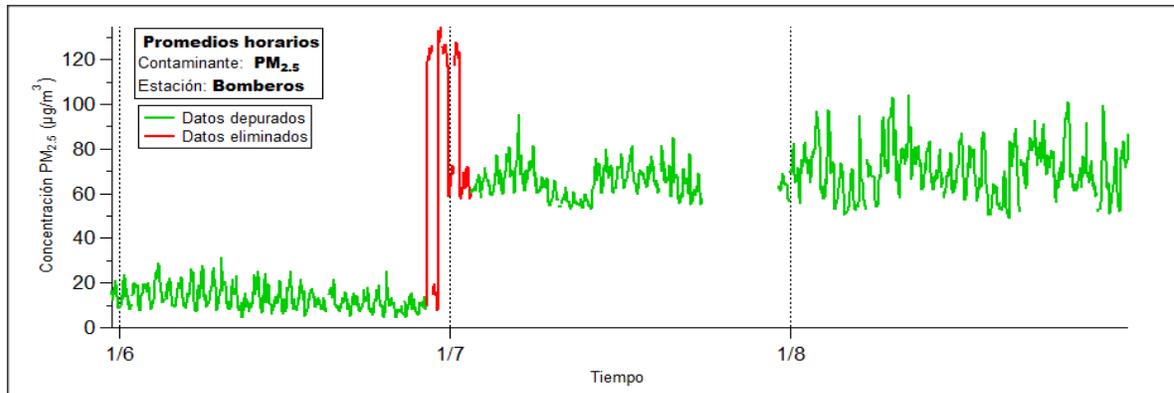


Ilustración 13. Muestra las concentraciones horarias de $\text{PM}_{2.5}$ registradas por la estación Bomberos, durante el periodo junio-agosto. En color rojo se muestran los datos descartados

- f) Por otro lado, aunque los datos no se descartaron si se realizó el cambio de línea base para los registros que van de julio a octubre. Se calculó el mínimo diario de todos los registros. Posteriormente se calcularon dos valores promedio de los mínimos: El primer valor promedio (7.00 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) abarcó de enero a junio, antes del cambio de línea base. El segundo promedio (58.42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) abarcó de julio a octubre, datos que registraron el cambio de línea base. La diferencia entre ambos promedios (51.42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) fue restada a los valores que tenían el cambio de línea base. El resultado se muestra en la Ilustración 14.

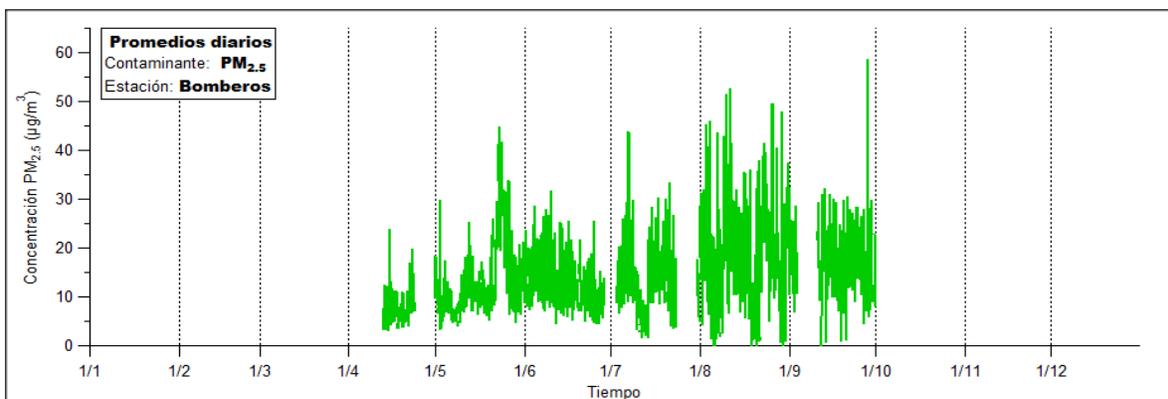


Ilustración 14. Muestra las concentraciones horarias de $\text{PM}_{2.5}$ registradas por la estación Bomberos, durante el año 2013 con el cambio de línea base aplicado a los datos registrados de julio a octubre.

7.2 Cumplimiento de las Normas Oficiales Mexicanas en materia de Calidad del Aire

Ozono: La estación Félix Osores contó con un total de 6985 datos horarios, de 8760 posibles, lo que equivale al 79% de datos; por lo tanto, el rendimiento se considera bueno. Por otro lado, para los promedios móviles de ocho horas se calcularon 6791 datos, equivalente al 78%, en consecuencia se concluyó que el rendimiento fue bueno. En la Ilustración 15 se observa que las concentraciones horarias no rebasan el límite máximo establecido por la Norma Oficial Mexicana (95 ppb), el cual se representa con una línea roja. Sin embargo, la concentración máxima registrada es de 82 ppb, valor que se encuentra cerca del límite establecido.

La Ilustración 16 muestra los promedios móviles de ocho horas calculados para todo el año. Los promedios no rebasan el límite máximo establecido (70 ppb); sin embargo, el promedio máximo calculado fue de 60 ppb, valor cercano al límite.

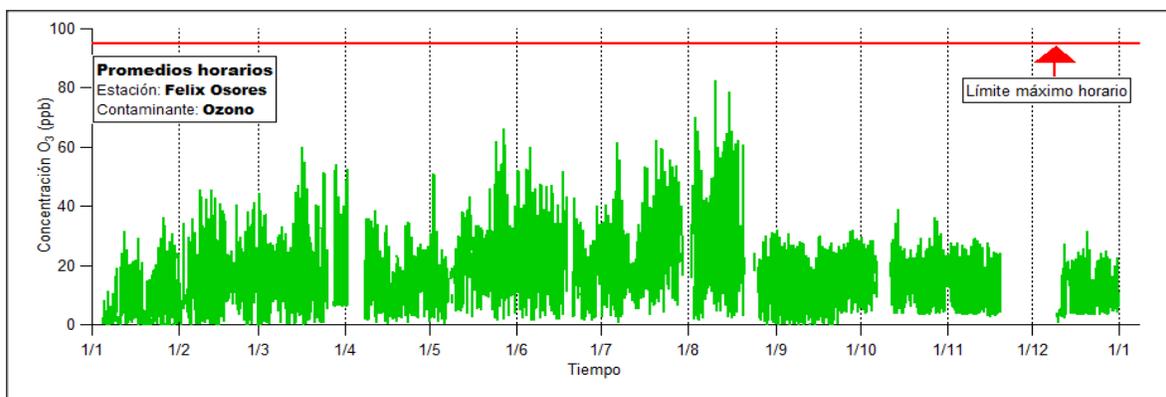


Ilustración 15. Muestra las concentraciones horarias de O_3 registradas por la estación Félix Osores durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado.

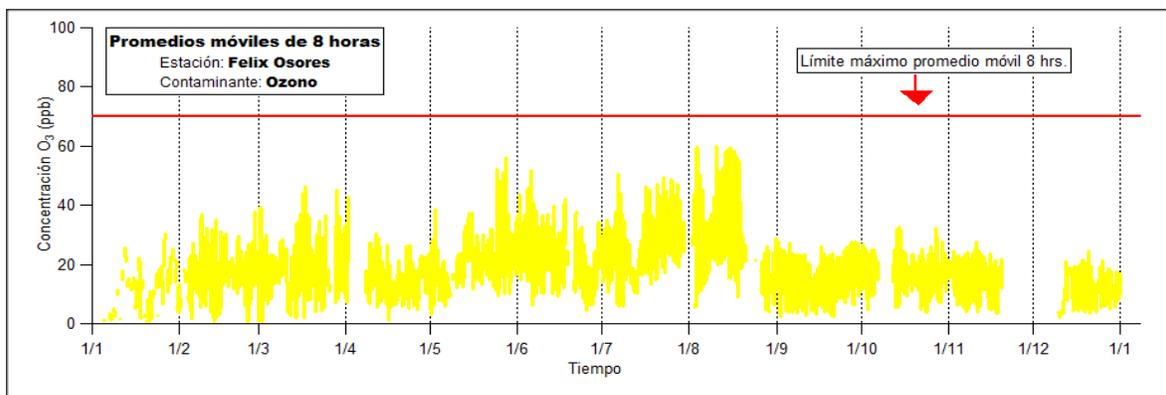


Ilustración 16. Muestra los promedios móviles de ochos horas del O_3 registradas por la estación Félix Osores durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado.

La estación El Marques contó con 3167 datos horarios de los 8760 posibles, esto equivale al 37% de datos, por lo que su rendimiento se considera malo. Se obtuvieron 3151 promedios móviles de 8 horas que corresponden a 35% de datos, en consecuencia el rendimiento es malo. Las concentraciones horarias rebasaron el límite máximo establecido por la norma durante los meses

de marzo y abril en 16 ocasiones. Como se puede observar en la Ilustración 17, la concentración máxima registrada fue de 127 ppb, muy por encima del límite establecido. Lo mismo sucede con el promedio móvil de 8 horas, cuyo valor máximo fue de 105 ppb. . El límite establecido para esta escala de tiempo, fue rebasado en 35 ocasiones durante los meses de marzo y abril (Ilustración 18).

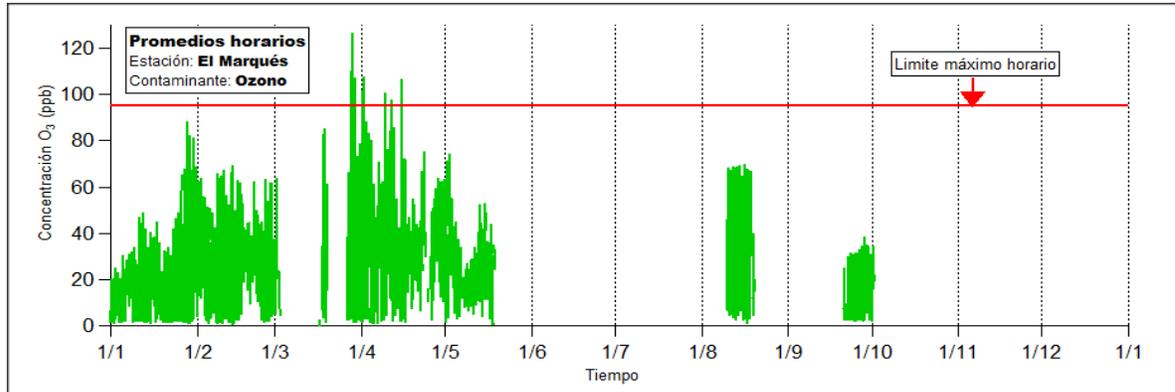


Ilustración 17. Muestra las concentraciones horarias de O_3 registradas por la estación El Marqués durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado.

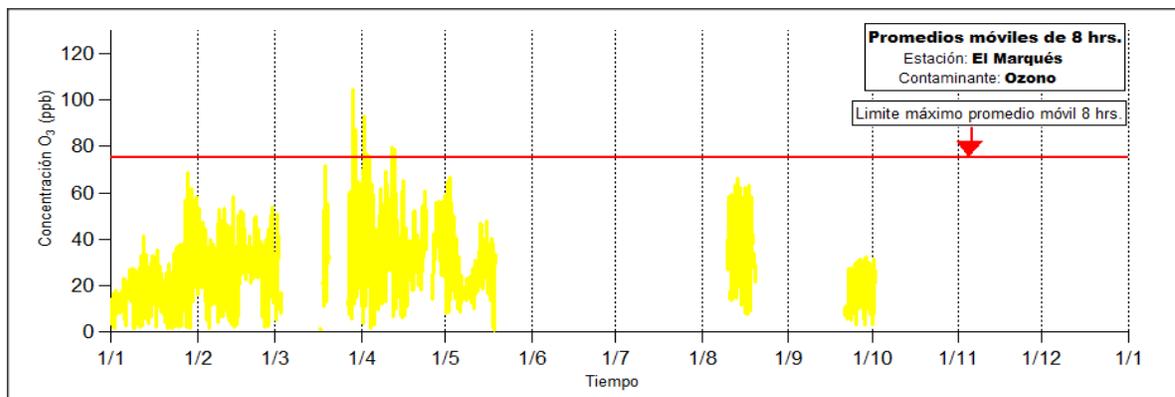


Ilustración 18. Muestra los promedios móviles de ocho horas del O_3 registradas por la estación El Marqués durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado.

La estación Del. Epigmenio contó con 7882 datos horarios, que equivalen al 90%, por lo que su rendimiento se consideró bueno. Se calcularon 7879 promedios móviles de ocho horas, que corresponden a 89% de datos, nuevamente el rendimiento se consideró bueno. En la Ilustración 19 se observa que las concentraciones horarias no rebasaron el límite máximo permitido en el año. Además la concentración máxima registrada fue de 63 ppb, valor que se encuentra muy por debajo del límite establecido. De igual forma, para los promedios móviles de 8 horas la norma se cumple. Ya que, el límite no fue rebasado en ninguna ocasión y el promedio máximo calculado fue de 52 ppb, valor lejano al límite máximo establecido (ver Ilustración 20).

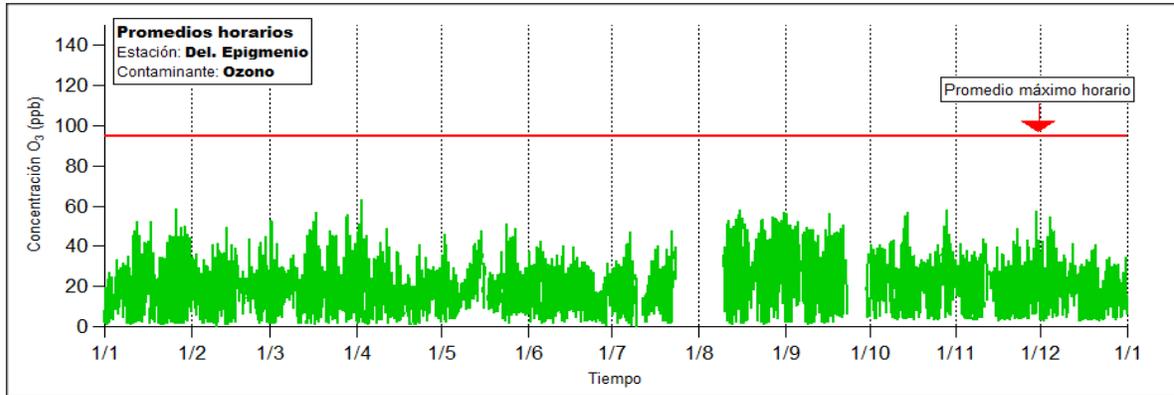


Ilustración 19. Muestra las concentraciones horarias de O₃ registradas por la estación Del. Epigmenio durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado.

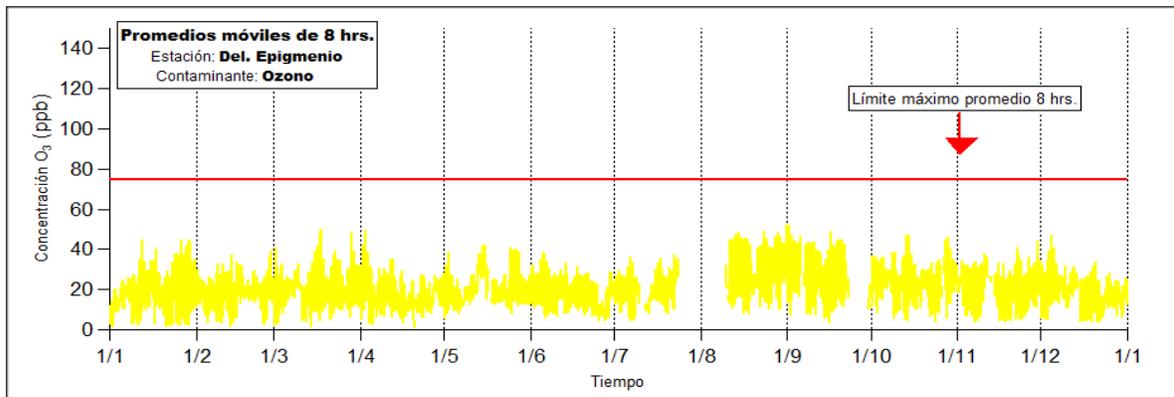


Ilustración 20. Muestra los promedios móviles de ochos horas del O₃ registradas por la estación Del. Epigmenio durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado.

La estación Bomberos contó con 4384 datos horarios, que equivale al 50%, por lo que su rendimiento se consideró regular. El límite máximo horario establecido fue rebasado en dos ocasiones durante el mes de junio (Ilustración 21). La concentración máxima registrada fue de 133 ppb. Se calcularon 4284 promedios móviles de ocho horas que equivalen al 49% de los datos, por lo tanto el rendimiento se consideró regular. El límite máximo normado para el promedio móvil de ocho horas fue rebasado en 7 ocasiones durante el mes de junio (Ilustración 22). El promedio máximo calculado fue de 76 ppb, valor que apenas rebasa el límite máximo establecido.

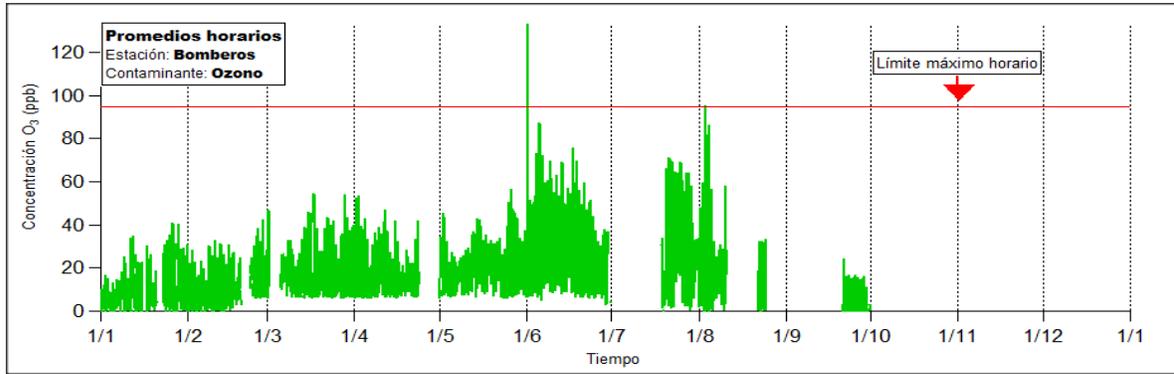


Ilustración 21. Muestra las concentraciones horarias de O₃ registradas por la estación Bomberos durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado.

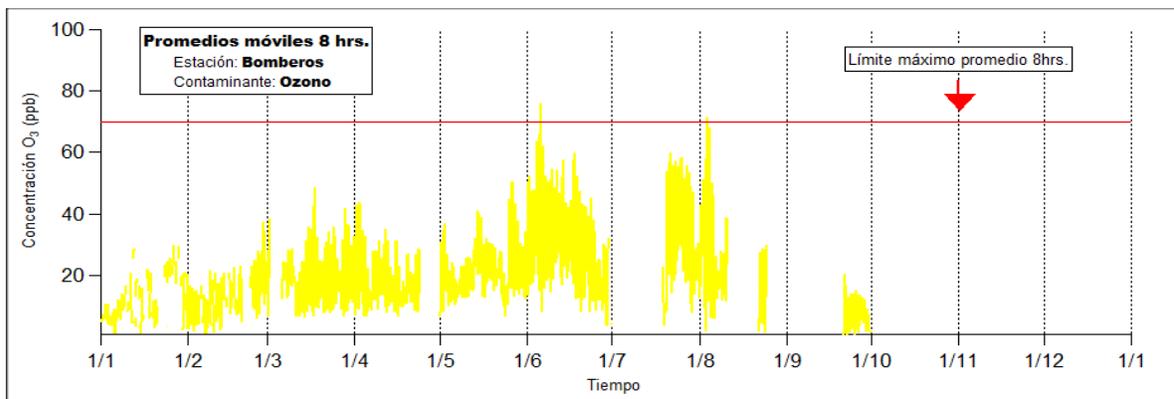


Ilustración 22. Muestra los promedios móviles de ocho horas del O₃ registradas por la estación Bomberos durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado.

Finalmente, el rendimiento de la estación Corregidora fue malo al contar con 2268 datos horarios (26% de datos). Por lo tanto, no se puede establecer el cumplimiento de la norma, a pesar de que la concentración máxima horaria registrada (70 ppb) está por debajo del límite establecido (Ilustración 23). La misma situación se repite con los promedios móviles de ocho horas. Se calcularon 2236 que equivalen al 25% y el máximo es de 63 ppb, aunque este valor es muy cercano al límite máximo establecido (ilustración 24).

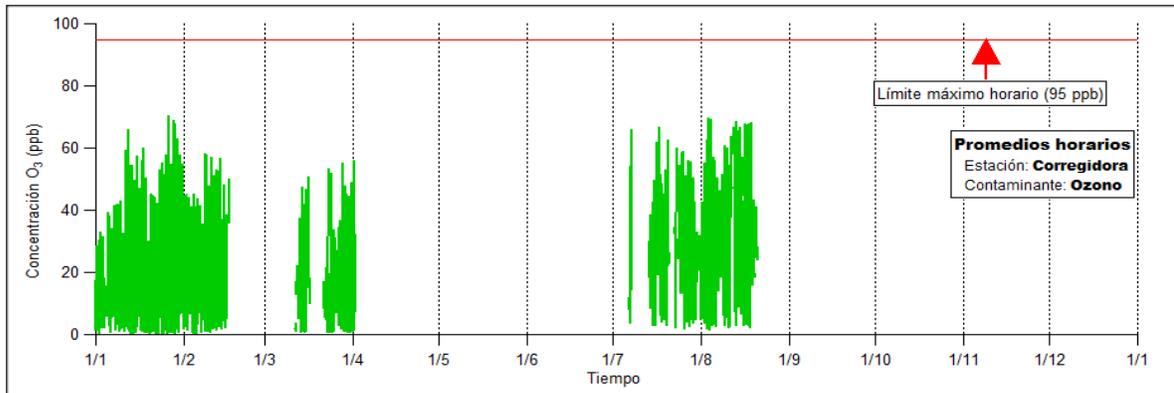


Ilustración 23. Muestra las concentraciones horarias de O₃ registradas por la estación Corregidora durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado.

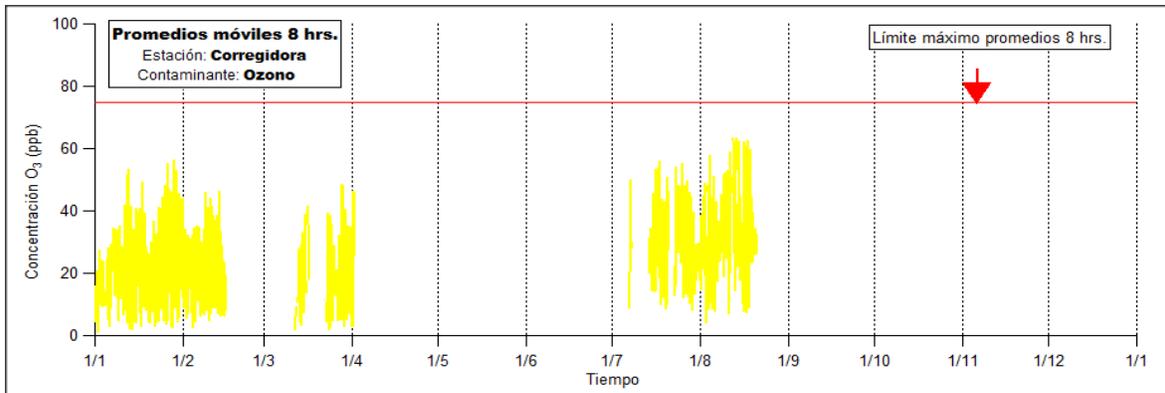


Ilustración 24. Muestra los promedios móviles de ocho horas del O₃ registradas por la estación Corregidora durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado.

En la Tabla 2 se presenta un resumen de la evaluación del cumplimiento de la normatividad oficial mexicana para el ozono, especificando los resultados obtenidos en las 5 estaciones automáticas de monitoreo.

La estación con la concentración horaria más alta es Bomberos. Por otro lado, el promedio móvil más alto fue calculado para la estación El Marqués. Esta diferencia se debe a que en la estación Bomberos únicamente se tienen dos concentraciones altas, mientras que para el Marqués son 16, lo que representa una mayor influencia en el cálculo de los promedios.

Tabla 2 Resumen del cumplimiento de la normatividad oficial mexicana para el ozono. Se incluye si se cumple o no la norma, el porcentaje de datos registrados, valor máximo registrado (Max), rendimiento (Rto) y el número de veces que la norma se rebasa (#).

| Estación/Norma | Promedio 1 hora | | | | | Promedio 8 horas | | | | |
|-----------------------|-----------------|------------|------------|---------|----|------------------|------------|------------|---------|----|
| | Cumple | % de datos | Máx. (ppb) | Rto. | # | Cumple | % de datos | Máx. (ppb) | Rto. | # |
| Félix Osores | Si | 79 | 82 | Bueno | | Si | 77 | 60 | Bueno | |
| El Marqués | No | 36 | 127 | Malo | 16 | No | 35 | 105 | Malo | 35 |
| Del. Epigmenio | Si | 89 | 63 | Bueno | | Si | 89 | 52 | Bueno | |
| Bomberos | No | 50 | 133 | Regular | 2 | No | 49 | 76 | Regular | 7 |
| Corregidora | No se sabe | 26 | 70 | Malo | | No se sabe | 25 | 63 | Malo | |

Dióxido de Azufre: La estación Félix Osores mostró un rendimiento malo, ya que se calcularon 154 promedios de 24 horas, lo que equivale al 42% de los datos. En la Ilustración 25 se muestran los promedios obtenidos y se puede observar que estos están muy por debajo del límite máximo normado (110 ppb). El promedio máximo calculado fue de 24 ppb, equivale al 21% de la máxima concentración permitida por las normas.

Se calcularon 3959 promedios móviles de ocho horas, que equivalen al 45% de los datos, por lo que el rendimiento de la estación se consideró malo. Los promedios móviles se muestran en la Ilustración 26 y no rebasan el límite máximo establecido (200 ppb). Por el contrario, el máximo calculado fue de 53 ppb que equivale al 26% de la concentración límite.

El promedio anual de esta estación no rebasa el límite establecido por la normatividad, ya que tiene un valor de 4.16 ppb.

Pese a lo descrito anteriormente no se puede concluir que la estación cumple con la normatividad; debido a que el porcentaje de datos en los tres promedios calculados es muy bajo.

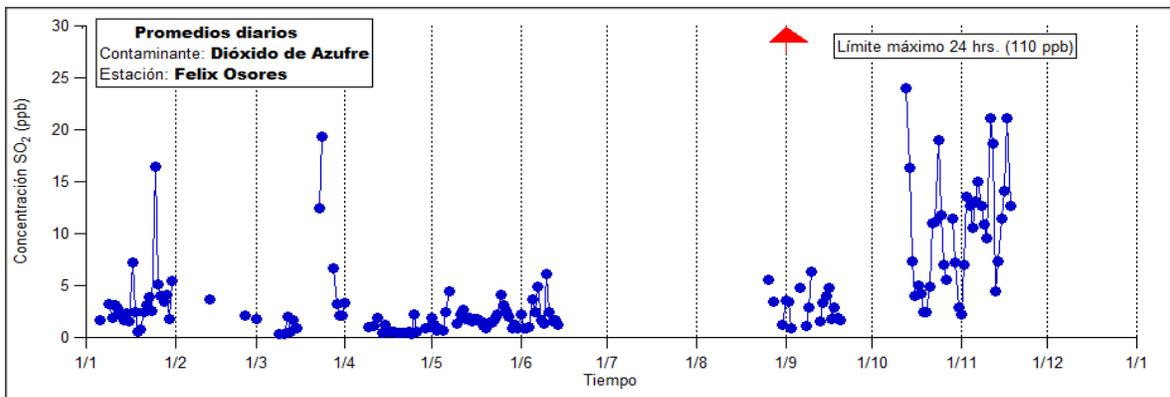


Ilustración 25. Muestra los promedios diarios del SO₂ registradas por la estación Félix Osores durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado.

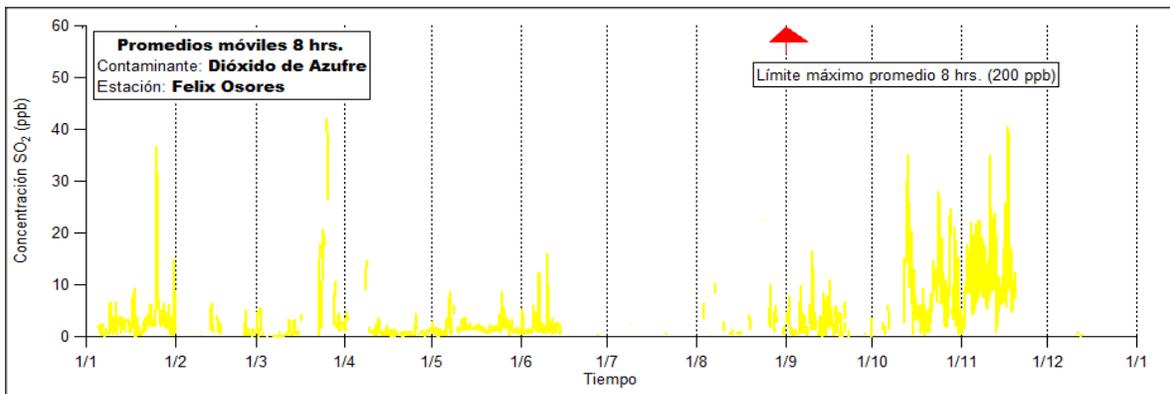


Ilustración 26. Muestra los promedios móviles de ochos horas del SO₂ registradas por la estación Félix Osores durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado.

Para la estación El Marqués se calcularon 98 promedios diarios, siendo el valor máximo 18 ppb, que equivalen al 27% de datos. Por lo tanto, el rendimiento se consideró malo. Por otro lado, se obtuvieron 2405 promedios móviles de 8 horas y el valor máximo fue de 46 ppb. Esto equivale al 28% de datos, en consecuencia el rendimiento se consideró malo. El promedio anual es de 2.1 ppb y se encuentran muy por debajo del límite máximo normado.

Debido al bajo porcentaje de datos no se puede concluir que se cumple con la normatividad en ninguno de los tres promedios.

En la Ilustración 27 se muestran los promedios de 24 horas obtenidos a partir de los datos horarios de la estación, estos promedios se encuentran por debajo del límite normado. En la ilustración 28 se presentan los promedios móviles de 8 horas y se observa que no rebasan el límite máximo establecido.

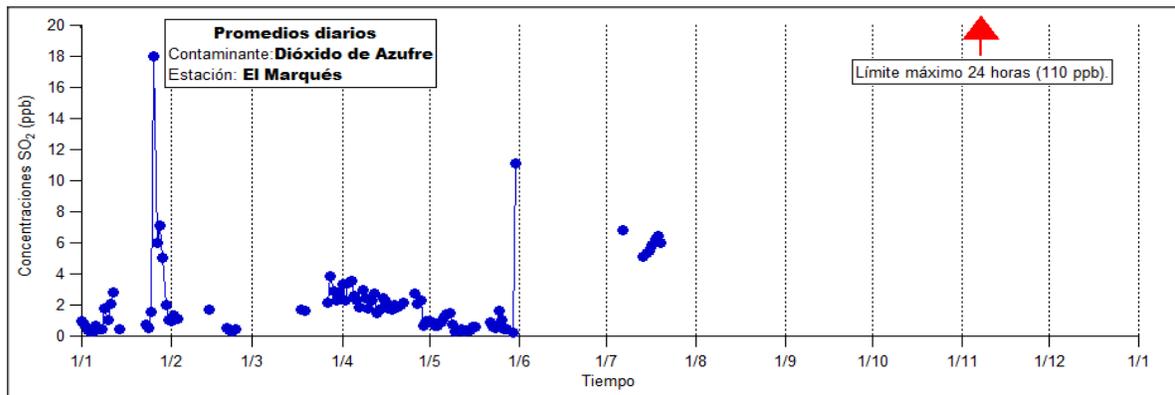


Ilustración 27. Muestra los promedios diarios del SO₂ registradas por la estación El Marqués durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado.

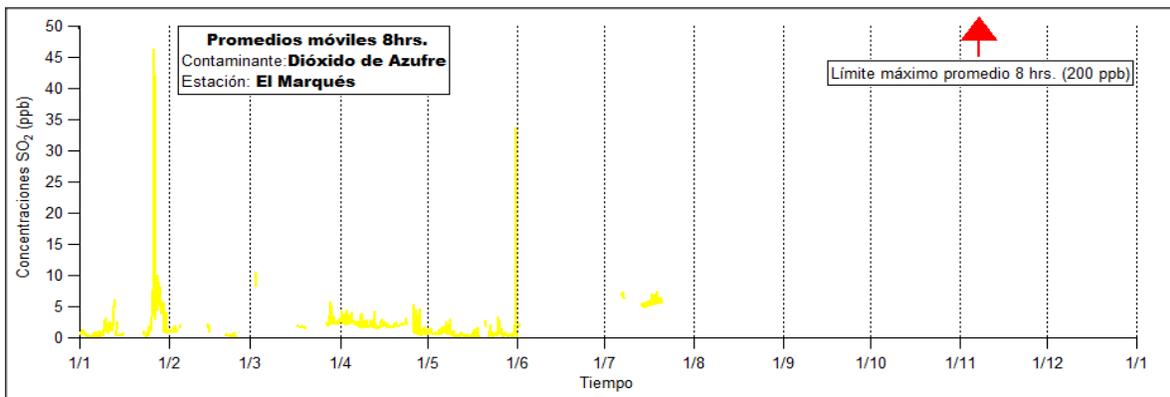


Ilustración 28. . Muestra los promedios móviles de 8 horas del SO₂ registradas por la estación El Marqués durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado.

El rendimiento de la estación Del. Epigmenio fue bueno, ya que contó con más del 75% de datos en el cálculo de los tres promedios normados. En la Ilustración 29 se muestran los promedios de 24 horas obtenidos, en total son 278 y equivalen al 76% de datos. Se observa que no rebasan el límite establecido por la normatividad. El promedio máximo diario calculado fue de 65 ppb, valor que equivale al 60% de la concentración límite. Se calcularon 7215 promedios móviles de 8 horas, equivalen al 82% de datos. En la Ilustración 30 se observa que estos no rebasan el límite normado. El promedio móvil máximo calculado fue de 82 ppb, y se encuentra muy por debajo del límite establecido. El promedio anual calculado fue de 4.53 ppb, el límite no es rebasado. Ésta es la única estación en la que se puede concluir que se cumple con la normatividad oficial mexicana, ya que los límites no son rebasados y cuenta con el número suficiente de datos.

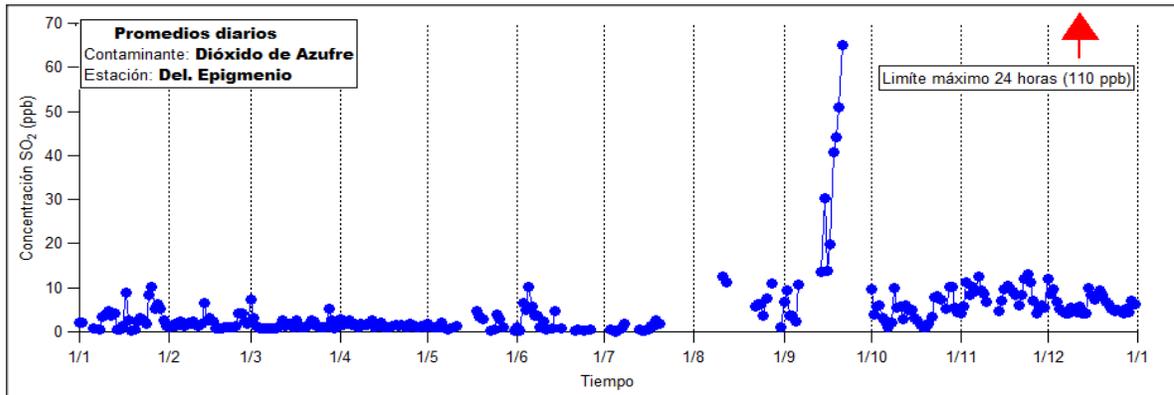


Ilustración 29. Muestra los promedios diarios del SO₂ registradas por la estación Del. Epigmenio durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado.

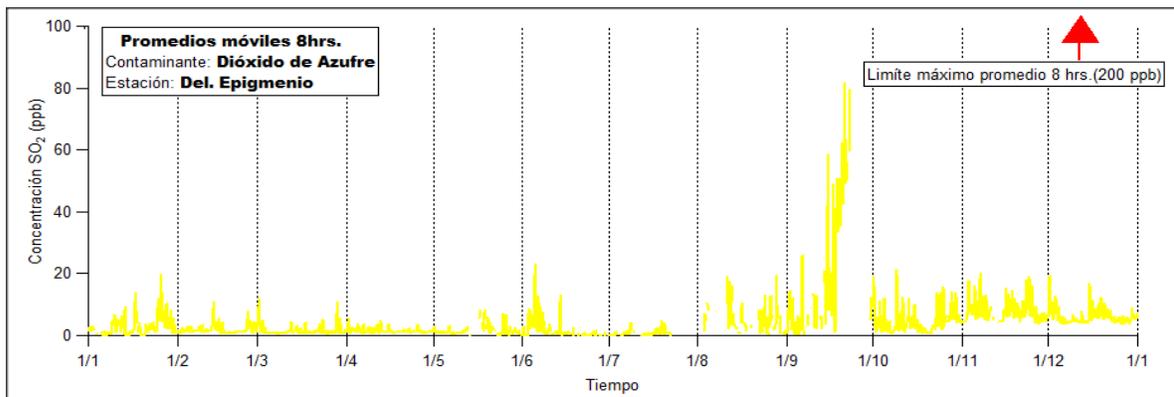


Ilustración 30 Muestra los promedios móviles de 8 horas del SO₂ registradas por la estación Del Epigmenio durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado.

Para la estación bomberos se calcularon 233 promedios de 24 horas, que equivalen al 63% de datos, por lo tanto tuvo un rendimiento regular. La Ilustración 31 muestra los datos diarios y cómo estos no rebasan el límite establecido por la norma. Por otro lado, se obtuvieron 5562 promedios móviles de ocho horas, que equivalen al 64% de datos, por lo que nuevamente el rendimiento se consideró regular. En la Ilustración 32 se observan los promedios móviles de 8 horas, y cómo no rebasan el límite establecido. Finalmente, el promedio anual se encuentra muy por debajo del límite máximo al tener un valor de 3.22 ppb.

Debido a que el porcentaje de datos es insuficiente, no se puede concluir que se cumple con la normatividad. Aunque los promedios máximos de 24 horas y móviles de 8 horas obtenidos sean de 33 y 72 ppb respectivamente.

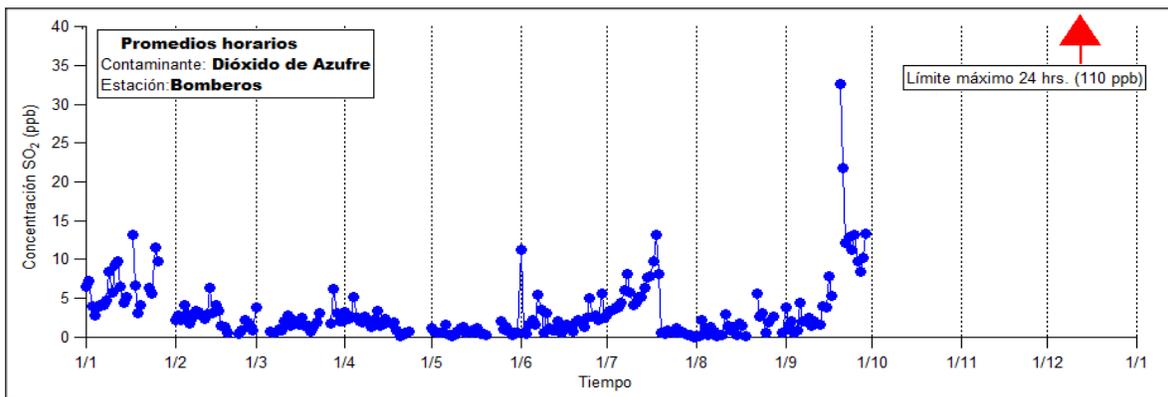


Ilustración 31. Muestra los promedios diarios del SO_2 registradas por la estación Bomberos durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado.

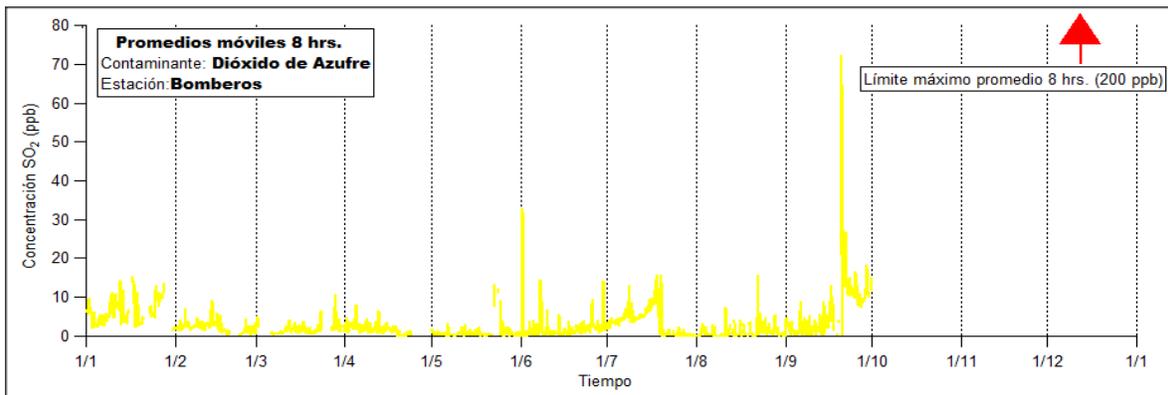


Ilustración 32. Muestra los promedios móviles de 8 horas del SO_2 registradas por la estación Bomberos durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado.

Para la estación Corregidora se obtuvieron 54 promedios de 24 horas, que equivalen al 15% de datos, por lo que el rendimiento se consideró malo. En la Ilustración 33 se muestran los promedios diarios obtenidos, se observa que estos no rebasan el límite máximo establecido, el valor máximo obtenido fue de 16 ppb. Por otro lado, se calcularon 1366 promedios móviles de 8 horas, los cuales equivalen al 16% de datos, en consecuencia el rendimiento se consideró malo. En la Ilustración 34 se muestran los promedios de 8 horas, que tampoco rebasan el límite máximo. El promedio anual obtenido fue de 2.89 ppb, valor que se encuentra muy por debajo del máximo permitido. Sin embargo, no se puede concluir que se cumple con la normatividad, ya que, el porcentaje de datos obtenidos en los tres promedios (24, 8 horas y anual) es muy bajo.

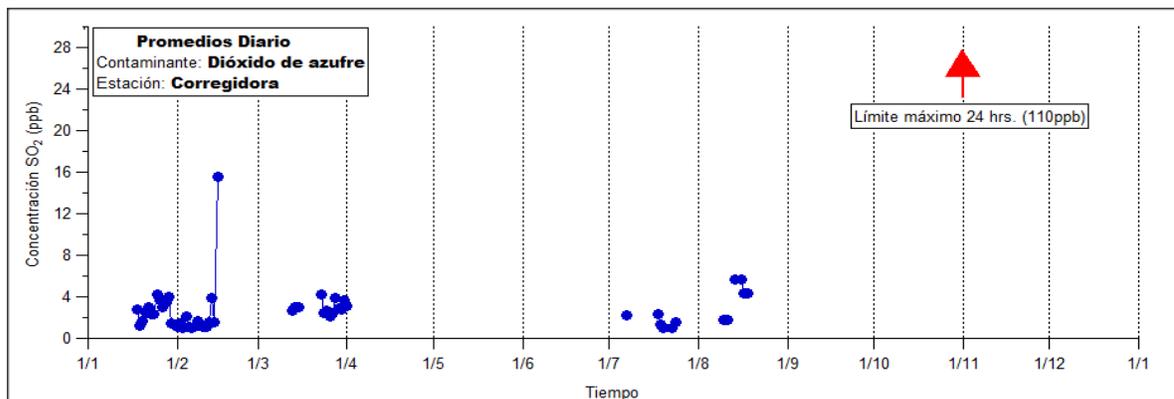


Ilustración 33. Muestra los promedios diarios del SO₂ registradas por la estación Corregidora durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado.

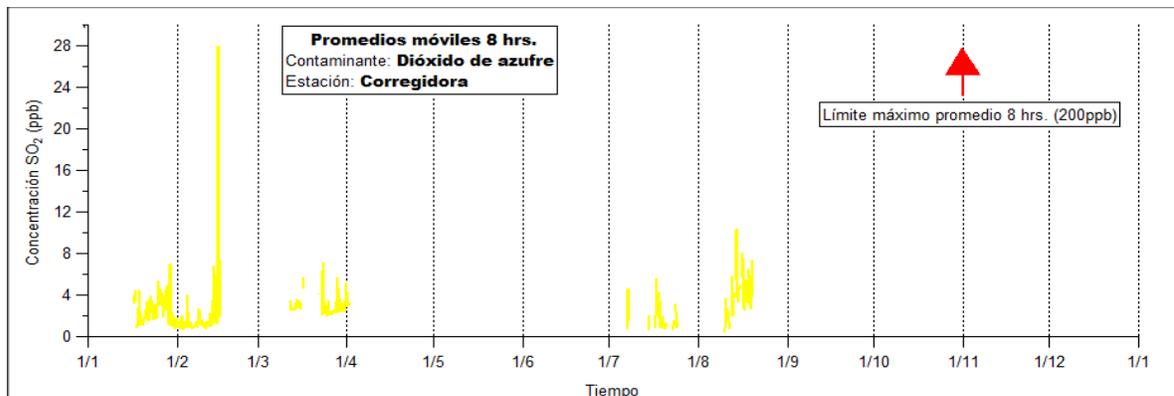


Ilustración 34 Muestra los promedios móviles de 8 horas del SO₂ registradas por la estación Corregidora durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado.

El resumen del cumplimiento de la normatividad oficial mexicana para el dióxido de azufre se muestra la

Tabla 3. Se observa una relación positiva entre el número de datos y el valor de los promedios calculados. Por ejemplo, la estación Del Epigmenio que cuenta con el mayor porcentaje de datos es también la que tiene los promedios más altos. El caso contrario es la estación Corregidora que cuenta con el porcentaje de datos y los promedios más bajos. Este comportamiento justifica la decisión de no concluir si se cumple con la normatividad oficial mexicana en estaciones que cuentan con bajos porcentajes de datos. Ya que, al no contar con datos durante todo el año no se tiene la

certeza de que las concentraciones de los contaminantes permanecieron por debajo del límite máximo establecido.

Tabla 3. Resumen del cumplimiento de la normatividad oficial mexicana para el dióxido de azufre. Se incluye si se cumple o no la norma, el porcentaje de datos registrados, valor máximo registrado (Max), rendimiento (Rto) y el número de

| Estación/Norma | Promedio 24 horas | | | Promedio 8 horas | | | Promedio Anual | | | Rto. |
|-----------------------|-------------------|------------|------------|------------------|------------|------------|----------------|------------|------------|----------------|
| | Cumple | % de datos | Máx. (ppb) | Cumple | % de datos | Máx. (ppb) | Cumple | % de datos | Registrado | |
| Félix Osores | No se sabe | 42 | 24 | No se sabe | 45 | 53 | No se sabe | 52 | 4 | Malo |
| El Marqués | No se sabe | 27 | 18 | No se sabe | 28 | 46 | No se sabe | 28 | 2 | Malo |
| Del. Epigmenio | Si | 76 | 65 | Si | 80 | 82 | Si | 82 | 5 | Bueno |
| Bomberos | No se sabe | 63 | 33 | No se sabe | 63 | 72 | No se sabe | 65 | 3 | Regular |
| Corregidora | No se sabe | 15 | 16 | No se sabe | 16 | 28 | No se sabe | 16 | 3 | Malo |

veces que la norma se rebasa (#).

Monóxido de Carbono: La estación Félix Osores tuvo un rendimiento bueno, al contar con 6999 promedios móviles de ocho horas, que equivalen al 81% de datos. En la Ilustración 35 se observa que en los días 11 y 12 de diciembre, los datos rebasan en 11 ocasiones el límite máximo establecido. La concentración máxima fue de 26 ppb, equivale a dos veces el límite máximo permitido, el cual se encuentra representado con una línea color rojo, dentro de la misma ilustración. Por lo antes descrito y ya que la estación cuenta con más del 75% de datos, se concluye que no se cumple con la normatividad durante el año 2013.

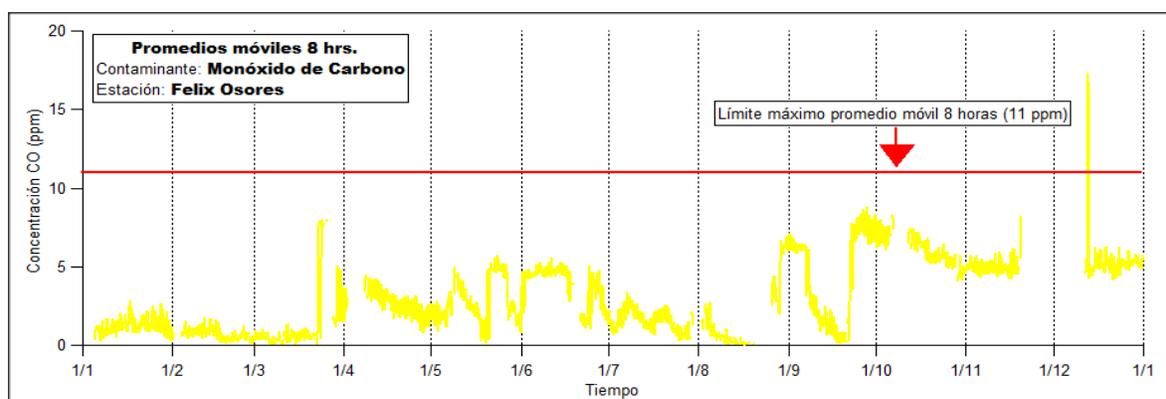


Ilustración 35. Muestra los promedios móviles de 8 horas del CO registradas por la estación Félix Osores durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado.

Para la estación El Marqués se calcularon 2546 promedios móviles de 8 horas, que equivale al 31% de datos, por lo que su rendimiento se consideró malo. El día 23 de febrero se registraron 3 concentraciones que superaron el límite máximo normado (Ilustración 36). El valor máximo fue de 19 ppb; por lo tanto, se concluye que la normatividad oficial mexicana no se cumple para el año 2013.

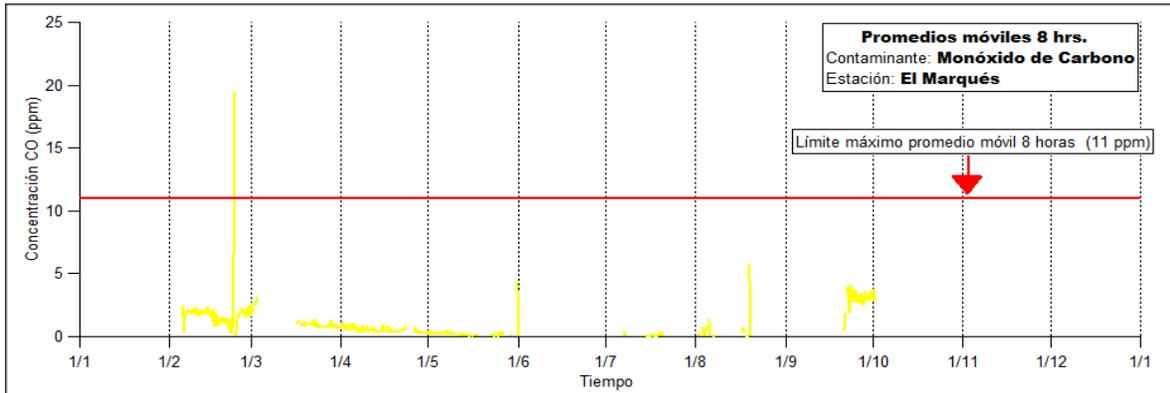


Ilustración 36. Muestra los promedios móviles de 8 horas del CO registradas por la estación El Marqués durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado

La estación Del. Epigmenio presentó un rendimiento regular, ya que se calcularon 5401 promedios móviles de ocho horas que equivalen al 64% de datos. Sin embargo, como se observa en la Ilustración 37, para el día 8 de julio se calcularon dos concentraciones que rebasan el límite máximo establecido. Por lo que, se concluye que la estación no cumple con la normatividad durante el año 2013.

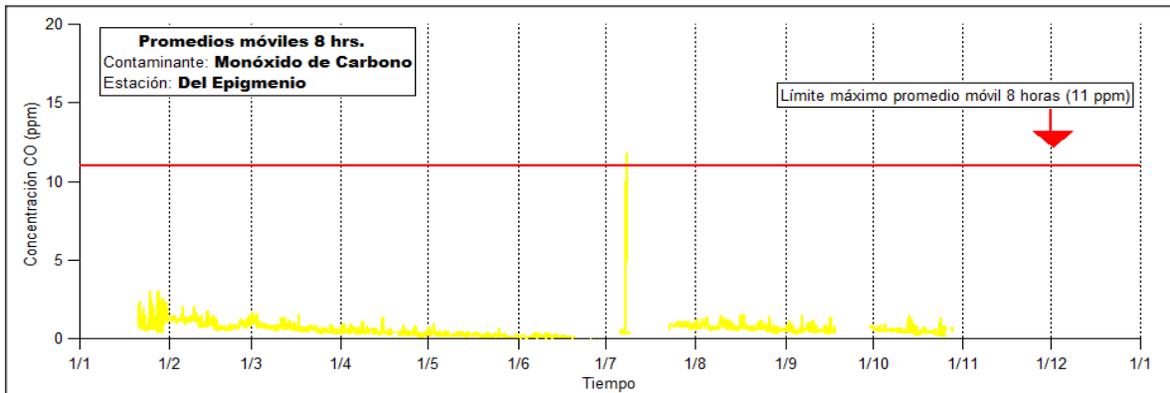


Ilustración 37. Muestra los promedios móviles de 8 horas del CO registradas por la estación El Marqués durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado

La estación bomberos presentó un rendimiento regular, se calcularon 5374 promedios móviles de ocho horas, que equivalen al 63% de datos. El límite normado es rebasado en 378 ocasiones durante el periodo junio-septiembre (Ilustración 38). El valor máximo fue de 28 ppb, casi tres veces el límite establecido por la norma. En consecuencia, se concluye que los datos registrados no cumplen con la normatividad oficial mexicana. Sin embargo, los promedios que rebasan el límite máximo establecido fueron calculados a partir de datos que resultaban poco confiables, pero no fueron descartados debido a la falta de bitácora del equipo de medición.

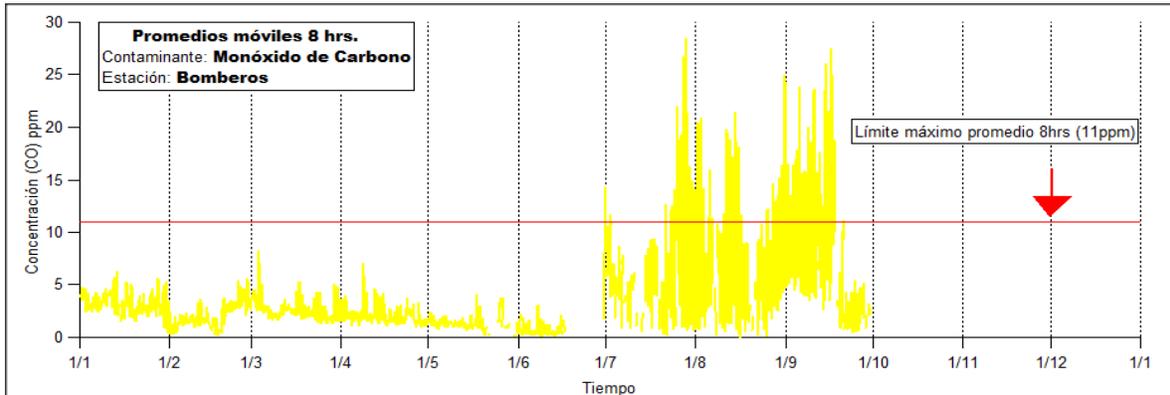


Ilustración 38. Muestra los promedios móviles de 8 horas del CO registradas por la estación Bomberos durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado

Finalmente, la estación Corregidora contó con un mal rendimiento, ya que se calcularon 2070 promedios móviles de ocho horas que equivalen al 24% de datos. Los promedios calculado para esta estación no cumplen con la normatividad, debido a que el límite máximo fue rebasado en 7 ocasiones durante el día 15 de febrero (Ilustración 39). El valor máximo calculado fue de 13 ppb, concentración que apenas rebasa el límite. Los datos a partir de los cuales se calcularon los promedios que rebasan en límite máximo no resultan confiables, ya que, el aumento en la concentración del CO se da de forma espontánea. Este comportamiento no se observa el resto del año dentro de la misma estación, pero si en las demás estaciones.

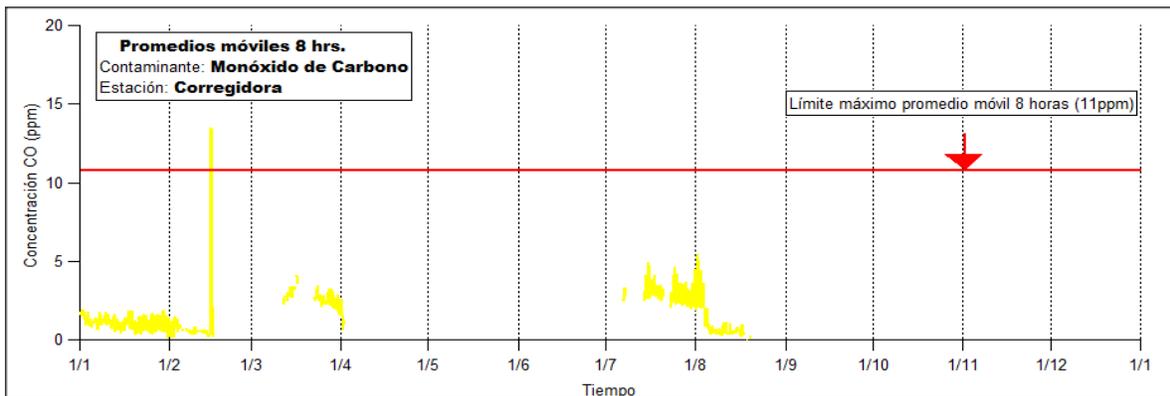


Ilustración 39. Muestra los promedios móviles de 8 horas del CO registradas por la estación Corregidora durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado

En la Tabla 4 se muestra el resumen del cumplimiento de la normatividad del monóxido de carbono. Este contaminante es el único en el que ninguna de las estaciones cumple con la normatividad oficial, aun con los bajos porcentajes de datos registrados. La estación Bomberos es la que registra los valores más altos, aunque los datos no son confiables. Por otro lado, la estación Del. Epigmenio y Corregidora tienen concentraciones que apenas si rebasan el límite establecido. El porcentaje de datos registrados para el CO en todas las estaciones es bajo, en comparación con los registrados para otros contaminantes.

Tabla 4. Resumen del cumplimiento de la normatividad oficial mexicana para el monóxido de carbono. Se incluye si se cumple o no la norma, el porcentaje de datos registrados, valor máximo registrado (Max), rendimiento (Rto) y el número de veces que la norma se rebasa (#).

| Estación/Norma | Promedio 8 horas | | | | |
|-----------------------|------------------|------------|------------|---------|-----|
| | Cumple | % de datos | Máx. (ppb) | Rto. | # |
| Félix Osores | No | 81 | 26 | Bueno | 11 |
| El Marqués | No | 31 | 19 | Malo | 3 |
| Del. Epigmenio | No | 64 | 12 | Regular | 2 |
| Bomberos | No | 63 | 28 | Regular | 378 |
| Corregidora | No | 24 | 13 | Malo | 7 |

Dióxido de Nitrógeno: El rendimiento de la estación Félix Osores se consideró regular, ya que contó con 5799 datos horarios, que equivalen al 66%. En la Ilustración 40 se observa que las concentraciones no rebasan el límite máximo. Por el contrario, el valor más alto registrado fue de 89 ppb el cual se encuentra muy por debajo del límite. Sin embargo, no se puede concluir que se cumple con la normatividad, debido a que el porcentaje de datos es menor a 75.

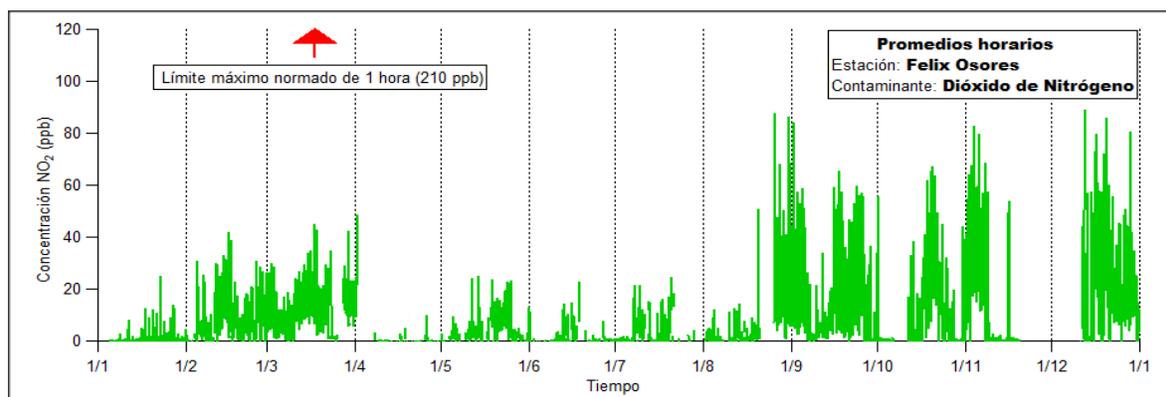


Ilustración 40. . Muestra los datos horarios del NO₂ registradas por la estación Félix Osores durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado

El rendimiento de la estación El Marqués fue malo, ya que contó con 3140 datos diarios, que equivalen al 35%. En la Ilustración 41 se observa que el valor de las concentraciones no rebasa el límite máximo establecido. El valor máximo registrado fue de 60 ppb (menos del 50% del valor límite). Sin embargo, no se puede concluir que la normatividad se cumple debido al bajo porcentaje de datos con el que cuenta la estación.

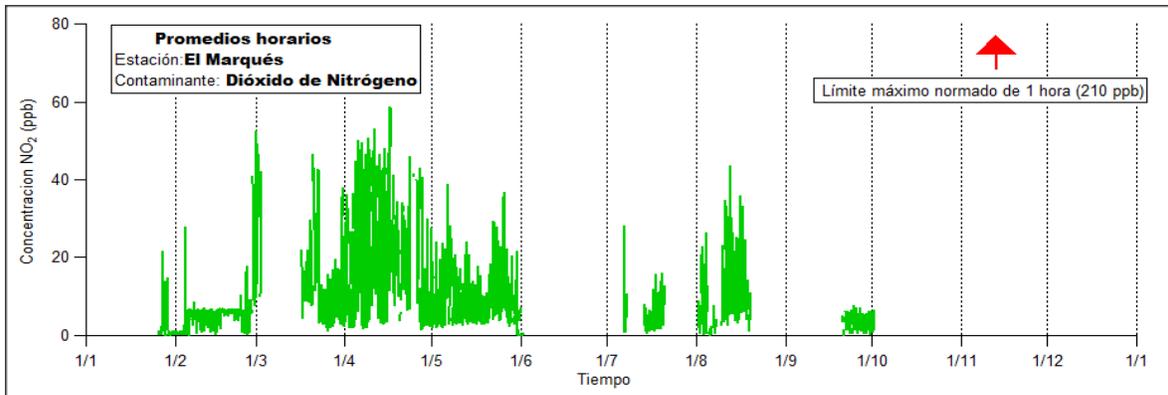


Ilustración 41. Muestra los datos horarios del NO₂ registradas por la estación El Marqués durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado

La estación Del Epigmenio contó con el 65% de datos, ya que únicamente registró 5716 datos horarios, por lo que su rendimiento fue considerado como regular. En la Ilustración 42 se observa que durante el mes de agosto se registraron 3 concentraciones que rebasan el límite máximo establecido, siendo 300 ppb el valor máximo. Por lo que, se concluye que no cumple con la normatividad durante el año 2013.

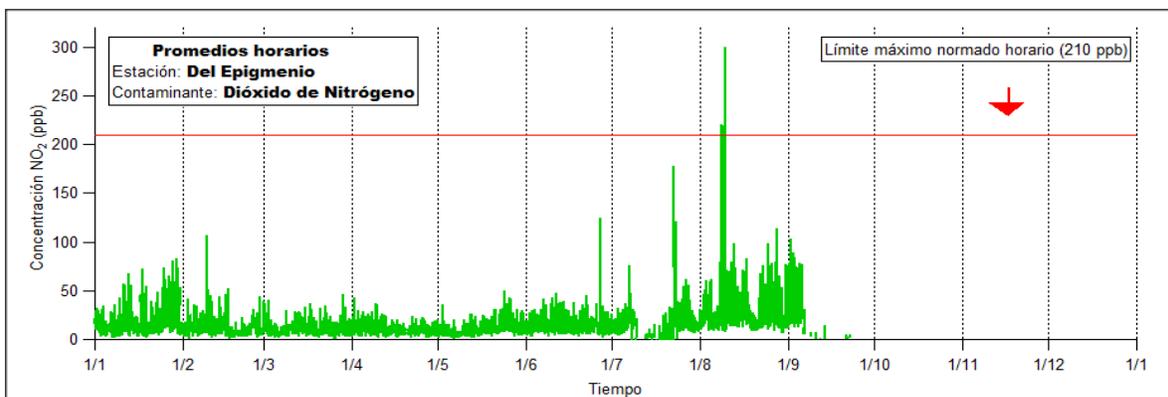


Ilustración 42. Muestra los datos horarios del NO₂ registradas por la estación Del. Epigmenio durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado

La estación Bomberos contó con 6297 datos horarios, que equivalen al 72%, por lo tanto su rendimiento se consideró regular. En la Ilustración 43 se muestran los datos horarios, se observa que ninguna de las concentraciones rebasa el límite establecido. Sin embargo, no se puede concluir que se cumple con la normatividad, debido al bajo porcentaje de datos con el que cuenta la estación.

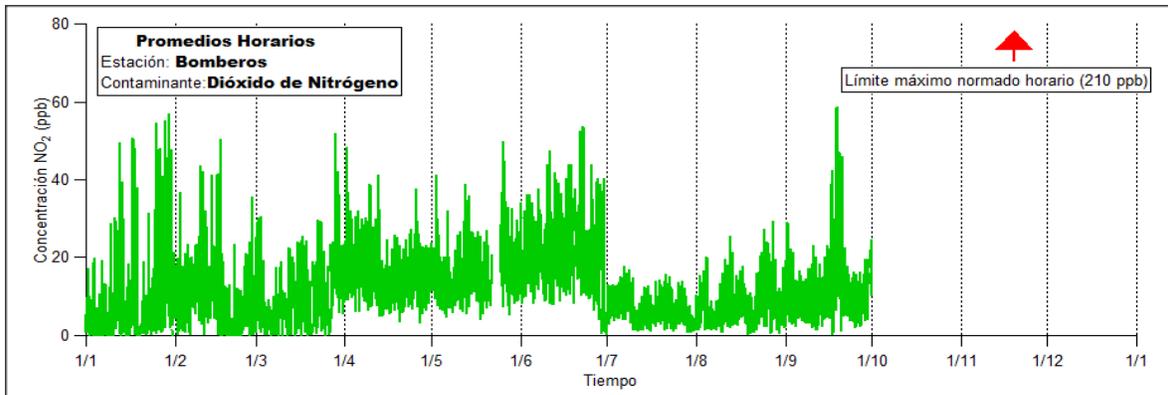


Ilustración 43. Muestra los datos horarios del NO₂ registradas por la estación Bomberos durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado

La estación Corregidora contó con el 25% de los datos, ya que únicamente registró 2270 datos horarios, por lo que su rendimiento se consideró malo. En la Ilustración 44 se observa que las concentraciones son bajas, el valor máximo registrado fue de 50 ppb. Es la estación que registró las concentraciones más bajas. A pesar de esto no se pudo concluir que cumple con la normatividad, debido a la insuficiencia de datos.

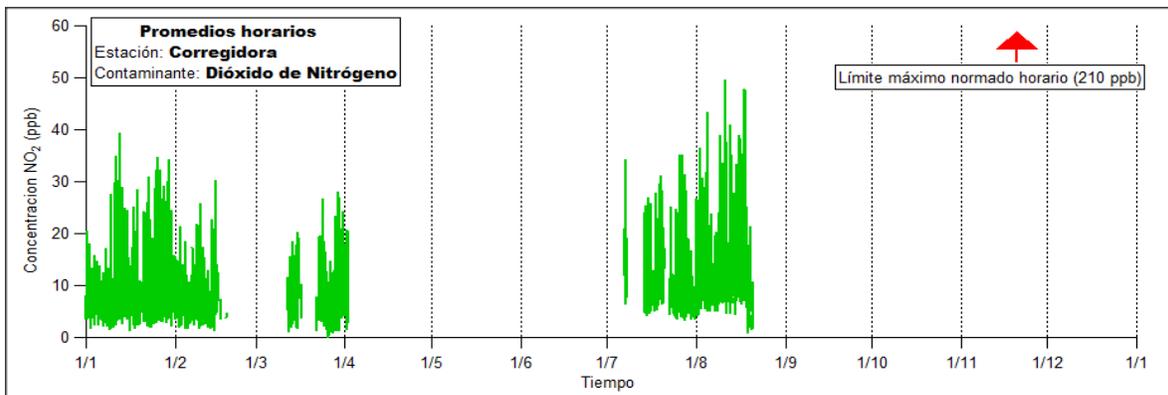


Ilustración 44. Muestra los datos horarios del NO₂ registradas por la estación Corregidora durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado

En la Tabla 5 se muestra el resumen del cumplimiento de la normatividad para el dióxido de nitrógeno. La estación que registró el valor más alto es Del. Epigmenio, a su vez es la única que no cumple con la normatividad. Sin embargo, la concentración que rebasa el límite es un pico esporádico y se no se observa otro similar a lo largo del año. El resto de las estaciones registró concentraciones muy por debajo del límite máximo establecido.

Tabla 5. Resumen del cumplimiento de la normatividad oficial mexicana para el dióxido de nitrógeno. Se incluye si se cumple o no la norma, el porcentaje de datos registrados, valor máximo registrado (Max), rendimiento (Rto) y el número de veces que la norma se rebasa (#).

| Estación/Norma | Promedio 1 hora | | | | |
|----------------|-----------------|------------|------------|---------|---|
| | Cumple | % de datos | Máx. (ppb) | Rto. | # |
| Félix Osores | No se sabe | 66 | 89 | Regular | |
| El Marqués | No se sabe | 35 | 59 | Malo | |
| Del. Epigmenio | No | 65 | 300 | Regular | 3 |
| Bomberos | No se sabe | 71 | 59 | Regular | |
| Corregidora | No se sabe | 25 | 50 | Malo | |

Material Particulado <10 µm: La estación El Marqués cuenta con 36 promedios de 24 de horas que equivalen al 10% de datos, los cuales se registran en los meses de abril y mayo, por lo que su rendimiento se consideró malo. En la Ilustración 45 se observa que los promedios no rebasan el límite máximo normado ($75\mu\text{g}/\text{m}^3$). Por el contrario, el promedio máximo calculado fue de $53\mu\text{g}/\text{m}^3$, valor que no se encuentra muy lejano al límite. Sin embargo, no se puede concluir que la normatividad se cumple, debido al bajo porcentaje de datos. Lo mismo sucede con el promedio anual, cuyo valor es de $23\mu\text{g}/\text{m}^3$ y se encuentra debajo del límite normado.

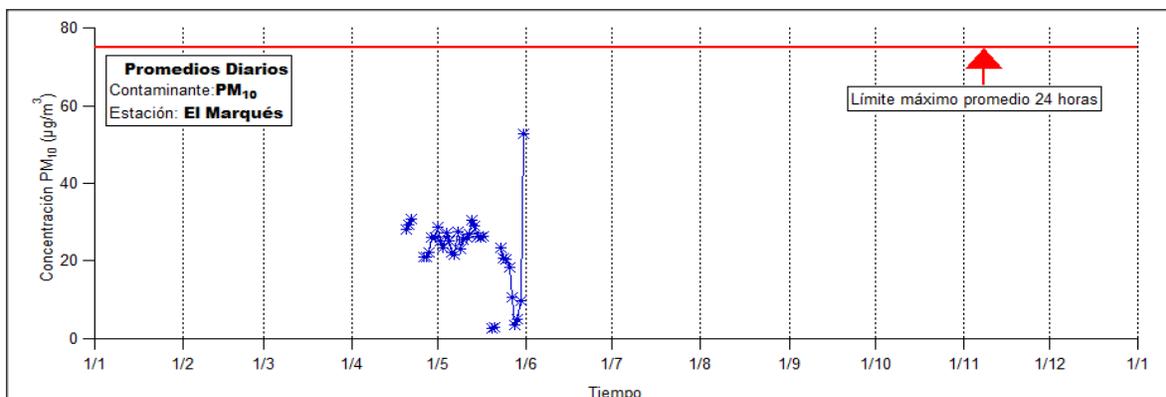


Ilustración 45. Muestra los promedios diarios de PM_{10} registradas por la estación El Márques durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado

La estación Del Epigmenio tuvo un rendimiento regular al contar con 246 datos diarios, que equivalen al 66%. En Ilustración 46 se observa que los promedios diarios no rebasan el límite máximo normado. El promedio máximo obtenido fue de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, que equivale aproximadamente al 50% del valor límite. Sin embargo, no se puede concluir que se cumple con la normatividad, ya que el porcentaje de datos registrados es menor a 75%. El promedio anual calculado (26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) no rebasa el límite máximo, pero debido a la insuficiencia de datos tampoco se puede concluir que se cumple con la normatividad.

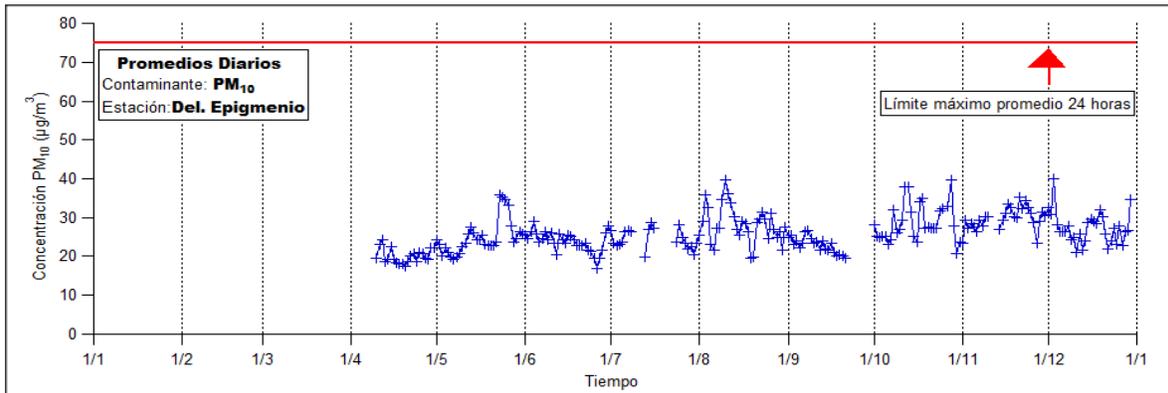


Ilustración 46. . Muestra los promedios diarios de PM_{10} registradas por la estación Del. Epigmenio durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado

Únicamente las estaciones El Marqués y Del. Epigmenio cuentan con datos para este contaminante. En la Tabla 6 se muestra el resumen del cumplimiento de la normatividad, se observa que El Marques tiene el promedio de 24 horas más alto. Esto se debe a que la estación registró una concentración por arriba de los 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, este episodio de alta concentración es único, no se repite el resto del año.

Tabla 6. Resumen del cumplimiento de la normatividad oficial mexicana para PM_{10} . Se incluye si se cumple o no la norma, el porcentaje de datos registrados, valor máximo registrado (Max), rendimiento (Rto) y el número de veces que la norma se rebasa (#).

| Estación/Norma | Promedio 24 horas | | | Promedio anual | | | Rto. |
|-----------------------|-------------------|------------|------------|----------------|------------|-----------|---------|
| | Cumple | % de datos | Máx. (ppb) | Cumple | % de datos | Calculado | |
| Félix Osores | Sin datos | --- | --- | Sin datos | --- | --- | --- |
| El Marqués | No se sabe | 10 | 53 | No se sabe | 10 | 23 | Malo |
| Del. Epigmenio | No se sabe | 66 | 40 | No se sabe | 66 | 26 | Regular |
| Bomberos | Sin datos | --- | --- | Sin datos | --- | --- | --- |
| Corregidora | Sin datos | --- | --- | Sin datos | --- | --- | --- |

Material Particulado < a 2.5 µm: La estación Félix Osores presentó un mal rendimiento al contar con 211 promedios diarios, que equivalen al 58% de datos. En la Ilustración 47 se visualiza que las concentraciones no rebasan el límite máximo establecido ($45\mu\text{g}/\text{m}^3$). El promedio máximo obtenido fue de $37\mu\text{g}/\text{m}^3$, valor que no se encuentra muy lejano al límite. El promedio anual calculado fue de $9\mu\text{g}/\text{m}^3$ y se encuentra muy por debajo del valor límite. Sin embargo, para ambos casos no se puede establecer que se cumple con la normatividad, ya que el porcentaje de datos con el que cuenta la estación es insuficiente.

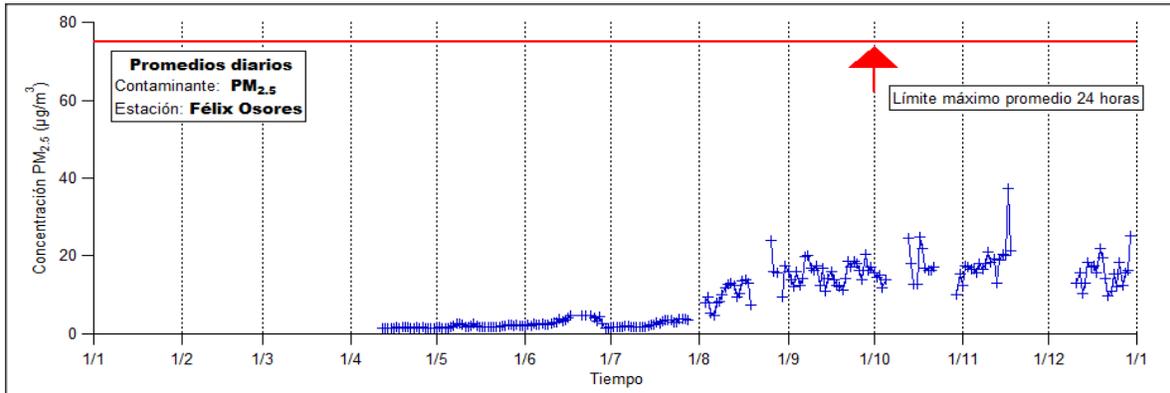


Ilustración 47. Muestra los promedios diarios de $\text{PM}_{2.5}$ registradas por la estación Félix Osores durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado

La estación bomberos contó con 143 promedios diarios que equivalen al 40% de datos, por lo que su rendimiento se consideró malo. En la Ilustración 48 se observa que partir del mes de julio los promedios obtenidos superan el límite máximo establecido, siendo el promedio máximo de $83\mu\text{g}/\text{m}^3$ casi el doble de lo permitido. En consecuencia, se concluye que no se cumple con la normatividad, a pesar el bajo porcentaje de datos. El promedio anual calculado fue de $42\mu\text{g}/\text{m}^3$ y está por encima del límite establecido. Es preciso recalcar que los datos registrados a partir del mes de julio no resultan confiables debido al cambio de línea base que se observa. Por otro lado, en la ilustración 49 se muestran los promedios diarios obtenidos a partir de la corrección en la línea base de los datos registrados de julio a octubre. En este caso, los promedios diarios no rebasan el límite máximo normado.

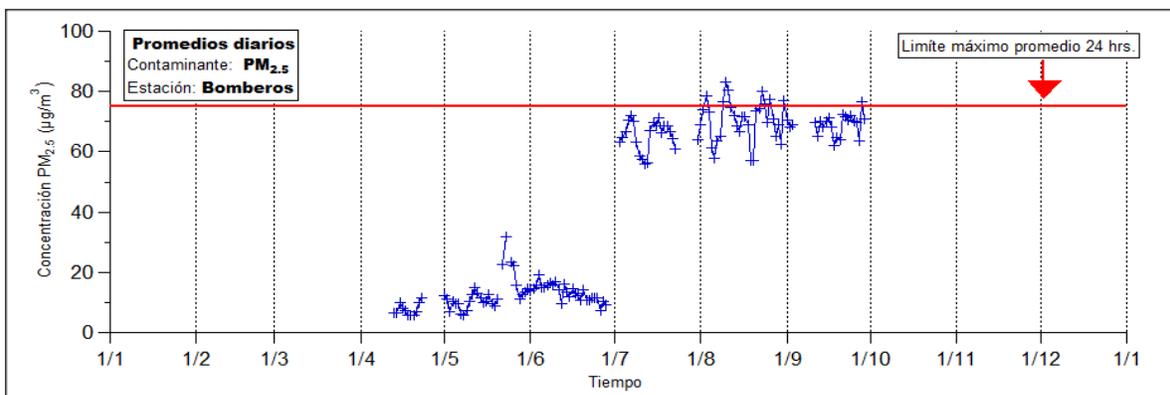


Ilustración 48. Muestra los promedios diarios de $\text{PM}_{2.5}$ registradas por la estación Bomberos durante el año 2013. Con una línea roja se representa el límite máximo normado

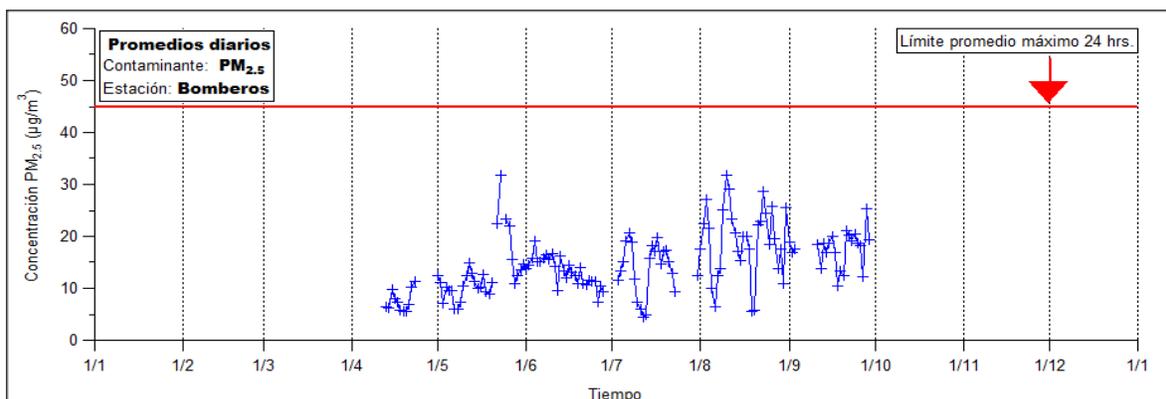


Ilustración 49 Muestra los promedios diarios de $PM_{2.5}$ calculados para la estación Bomberos durante el año 2013 a partir del cambio de línea base de los datos horarios registrados de julio a septiembre. Con una línea roja se representa el límite máximo normado.

Las dos estaciones que cuentan con datos son Félix Osores y Bomberos, el resumen del cumplimiento de la normatividad para ambas estaciones se muestra en la Tabla 7. Los promedios obtenidos para la estación Bomberos son dos veces más grandes que los obtenidos para Félix Osores, aunque el porcentaje de datos es mayor en Félix Osores. Esto es debido a que los datos registrados por Bomberos sufrieron un cambio de línea base a partir del mes de julio, lo que provoca el registró de concentraciones más altas.

Tabla 7. Resumen del cumplimiento de la normatividad oficial mexicana para $PM_{2.5}$. Se incluye si se cumple o no la norma, el porcentaje de datos registrados, valor máximo registrado (Max), rendimiento (Rto) y el número de veces que la norma se rebasa (#).

| Estación/Norma | Promedio 24 horas | | | Promedio anual | | | Rto. |
|-----------------------|-------------------|------------|------------|----------------|------------|-----------|------|
| | Cumple | % de datos | Máx. (ppb) | Cumple | % de datos | Calculado | |
| Félix Osores | No se sabe | 58 | 37 | No se sabe | 58 | 9 | Malo |
| El Marqués | Sin datos | --- | --- | Sin datos | --- | --- | |
| Del. Epigmenio | Sin datos | --- | --- | Sin datos | --- | --- | |
| Bomberos | No | 40 | 83 | No | 40 | 42 | Malo |
| Corregidora | Sin datos | --- | --- | Sin datos | --- | --- | |

7.3 Análisis temporal de los contaminantes criterio

7.3.1 Ciclos Diurnos

Una vez que se clasificaron los datos horarios en 24 grupos (1 grupo por hora), se realizó un análisis exploratorio de los mismos mediante el cálculo de promedios, medianas, percentiles, máximos y mínimos; esto con el objetivo de observar su variabilidad a lo largo del año. Esto se hizo mediante el uso de gráficas de caja, donde se puede visualizar la distribución de los valores. Las características evaluadas en estos gráficos fueron: la diferencia entre el valor del promedio y mediana. La longitud de la distancia entre el valor mínimo y el percentil 25, así como entre el máximo y el percentil 75, lo cual nos da una idea de la distribución de los datos. Este análisis se realizó para todos los contaminantes en todas las estaciones y las gráficas se encuentran en la sección C de los anexos.

En la Ilustración 50 se muestran los resultados obtenidos para el monóxido de carbono en la estación Bomberos. Se observa que en algunas horas del día el promedio es más alto que la mediana; lo cual coincide con las horas en las que se registran los valores máximos. Además, el rango de valores de los datos registrado es más amplio entre las 11:00 y las 18 horas.

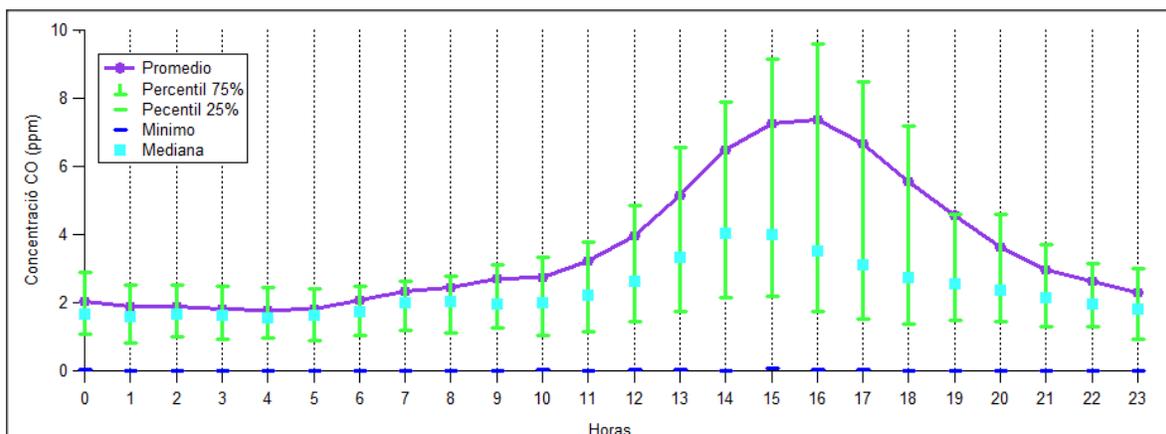


Ilustración 50 Muetsra el ciclo diurno del monóxido de carbono en la estación Bomberos obtenido con los datos del 2013

Se decidió utilizar las medianas como valores representativos para describir el comportamiento diurno de los contaminantes. Esto debido a las diferencias observadas entre los valores de los promedios, los cuales son influenciados por las concentraciones máximas, y las medianas obtenidos para cada hora del día.

Otro aspecto a tomar en cuenta para en análisis del ciclo diurno, fue el porcentaje de datos registrado por cada estación a lo largo del año. Debido a que éste fue muy diferente entre cada estación, se decidió utilizar únicamente los meses que tuvieran el porcentaje de datos más alto en todas las estaciones y para cada contaminante. Esto resultó en el procesamiento de los datos de dos meses, los cuales varían según el contaminante. Aunque cada mes representa una temporada distinta del año: temporada seca y temporada de lluvias.

Ozono: Para este contaminante se procesaron los datos obtenidos durante los meses de enero y agosto. Los resultados obtenidos para el mes de enero se muestran en la parte superior de la Ilustración 51. Se observa un pico de máxima concentración entre las 14:00 y las 16:00 en todas las estaciones. El valor de este pico varía según la estación, siendo el máximo registrado por la estación Corregidora (45 ppb). Entre las 7:00 y las 9:00 horas se observa una disminución de la concentración, aunque en algunas estaciones es más claro que en otras. La concentración de ozono se mantiene constante entre las 00:00 y las 7:00 horas. Finalmente, de las 17:00 a las 20:00 horas se observa una disminución abrupta de la concentración de ozono.

Los resultados obtenidos para agosto se muestran en la parte inferior de la Ilustración 51. En este caso, el pico de concentración máxima abarca más horas que en el mes de enero, ya que va de las 13:00 a las 16:00 horas. La estación que registra la concentración más alta es El Marqués (63 ppb). Nuevamente se observa una disminución en las concentraciones, pero en esta ocasión entre las 6:00 y las 8:00 horas; a comparación del mes de enero, esta disminución de las concentraciones es claro en todas las estaciones. De las 00:00 a las 6:00 horas la concentración de ozono disminuye gradualmente. Del mismo modo sucede de las 16:00 a las 20:00 horas.

Tanto en enero como en agosto se observa un comportamiento similar: un valor máximo alrededor del mediodía, un valor mínimo entre las 6:00 y las 9:00 horas. Además una disminución en la concentración de ozono de las 00:00 a las 6:00 horas aproximadamente. También, en la Ilustración 51 se observa claramente que en el mes de agosto las concentraciones de ozono son mayores a las registradas durante el mes de enero. Ya que, el promedio máximo obtenido en agosto fue de 60 ppb, mientras que en enero fue de 40 ppb.

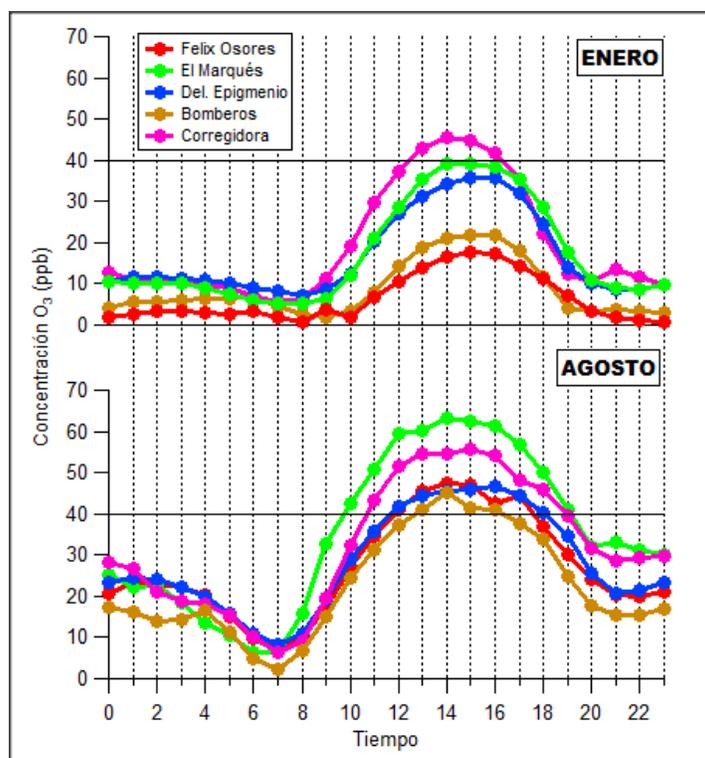


Ilustración 51. Muestra una comparación entre el ciclo diario obtenido en enero (parte superior) y el obtenido en agosto (parte inferior) para el ozono durante el 2013

En la Tabla 8 se muestra el porcentaje de datos obtenido durante enero y agosto en todas las estaciones. Se observa que el porcentaje de datos mensuales varía según la estación de monitoreo y el mes. El rango de valores en el que entran los porcentajes de todas las estaciones es muy amplio. Por lo tanto, para disminuir el margen de error al hacer la comparación, se utilizaron los meses que tuvieron el porcentaje de datos más alto en la mayoría de las estaciones (enero y agosto).

| Estación/Mes | Félix Osores | El Marqués | Del. Epigmenio | Bomberos | Corregidora |
|---------------|--------------|------------|----------------|----------|-------------|
| Enero | 47% | 99% | 99% | 61% | 99% |
| Agosto | 70% | 30% | 69% | 42% | 58% |

Tabla 8. Porcentaje de datos registrados durante los meses de enero y agosto en todas las estaciones durante el 2013.

Dióxido de Azufre: Para este contaminante se procesaron los datos de enero y julio. En la parte superior de la Ilustración 52 se muestra el ciclo diurno del dióxido de azufre para el mes de enero. A diferencia del ozono, éste contaminante no muestra un patrón de comportamiento claro a lo largo del día. En todas las estaciones, excepto Bomberos, se observa una disminución de la concentración entre las 14:00 y las 19:00 horas, aunque ésta no es del todo clara. Además, se observan dos máximos de concentración a lo largo del día. Sin embargo, la hora de estos no es la misma en todas las estaciones: para Bomberos y Corregidora el primer pico se presenta alrededor de las 10:00 horas, mientras que el segundo lo hace alrededor de las 22:00 horas. En el caso de la estación Del. Epigmenio, el primer pico se observa a las 12:00 y el segundo a las 22:00. En el Marques y Bomberos no se observa claramente este comportamiento.

En la parte inferior de la Ilustración 52 se muestra el ciclo diurno obtenido para el mes de julio. En todas las estaciones se observa un comportamiento distinto, es decir, no hay un patrón claro. La estación Félix Osores registra concentraciones muy bajas, cercanas a los 0 ppb, durante las primeras horas de la mañana. Las estaciones Bomberos y El Marqués registran las concentraciones más altas. En el caso de Bomberos este comportamiento coincide con el observado durante el mes de enero. Las estaciones Corregidora y Del. Epigmenio tienen un comportamiento similar a lo largo del día, con un máximo alrededor del mediodía.

Tanto en enero como en julio no se observa un patrón de comportamiento claro en todas las estaciones. Aunque en enero las estaciones Félix Osores, Del. Epigmenio y Corregidora, muestran un comportamiento bimodal. Por otro lado, las estaciones de Bomberos, Del. Epigmenio, Félix Osores y Corregidora registran concentraciones más bajas durante el mes de julio, mientras que para la estación El Marqués esto sucede en el mes de enero.

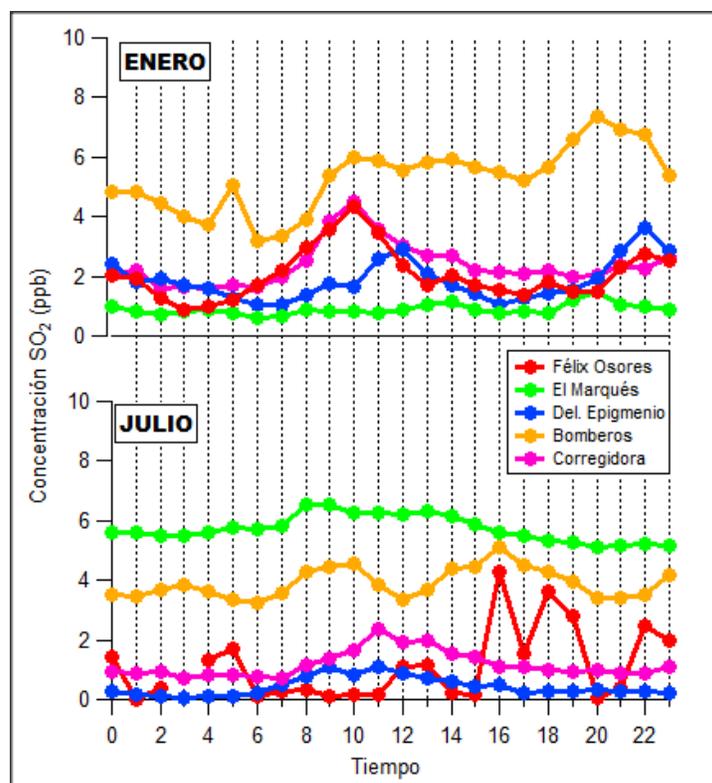


Ilustración 52. Muestra el ciclo diario obtenido para el dióxido de azufre en los meses de enero y julio durante el 2013.

En la Tabla 9 se muestra el porcentaje de datos obtenido para el dióxido de azufre durante los meses de enero y julio. El porcentaje de datos obtenido en enero se encuentra dentro del mismo rango (70-80%) en todas las estaciones, excepto Corregidora. Por otro lado, durante el mes de julio el porcentaje de datos es muy bajo en la mayoría de las estaciones. Sin embargo, es el más alto obtenido, para este contaminante, en la segunda mitad del año.

| Estación/Mes | Félix Osos | El Marqués | Del. Epigmenio | Bomberos | Corregidora |
|--------------|------------|------------|----------------|----------|-------------|
| Enero | 81% | 74% | 88% | 75% | 48% |
| Julio | 11% | 26% | 54% | 94% | 22% |

Tabla 9. Porcentaje de datos obtenidos durante los meses de enero y julio.

Monóxido de Carbono: Se procesaron los datos obtenidos durante los meses de febrero y agosto, esto debido a la variabilidad del porcentaje de datos obtenido por cada estación. Además, se realizó una depuración extra de los mismos, que consistió en descartar los datos que rebasaron el valor de 10 ppm, ya que al ser valores esporádicos no son concentraciones representativas. En la parte superior de la Ilustración 53 se muestra el ciclo diario del monóxido de carbono obtenido durante el mes de febrero. Se observan dos picos de máximas concentración en la mayoría de las estaciones, exceptuando Bomberos. El primero pico se presenta entre las 7:00 y las 9:00 horas, mientras que el segundo se registra entre las 19:00 y las 21:00 horas. El resto del día la concentración permanece casi constante, aunque no con el mismo valor para todas las estaciones. Por otro lado, Bomberos presenta un pico de máxima concentración entre las 14:00 y las 16:00 horas, además de los dos picos antes mencionados.

La parte inferior de la Ilustración 53 muestra el ciclo del diurno del monóxido de carbono obtenido para el mes de agosto. A diferencia del obtenido en febrero, en éste no se observa un patrón de comportamiento claro. Puede apreciarse un pico de alta concentración durante la mañana en la mayoría de las estaciones, excepto para Bomberos, donde el pico se observa por la tarde. El rango de concentración registrado a lo largo del día es similar en la mayoría de las estaciones, excepto Bomberos. Para esta estación fue necesario multiplicar las concentraciones obtenidas por 0.3, con el objetivo de que la concentración de todas las estaciones estuviera dentro de la misma escala. La Ilustración 53 muestra una comparación de los ciclos diurnos obtenidos durante los meses de febrero y agosto. La estación Bomberos presenta un máximo de concentración durante la tarde en ambos meses. La concentración de las estaciones Corregidora, Félix Osores y Del Epigmenio tienen un comportamiento similar a lo largo del día en el mes de febrero, incluso se encuentran dentro del mismo rango de valores. Para el mes de agosto son las estaciones de Del. Epigmenio, Corregidora y el Marqués, las que se encuentran dentro del mismo rango de valores. No existe una diferencia significativa entre el valor de las concentraciones obtenidas en ambos meses, excepto para la estación Bomberos donde la concentración es mayor en agosto.

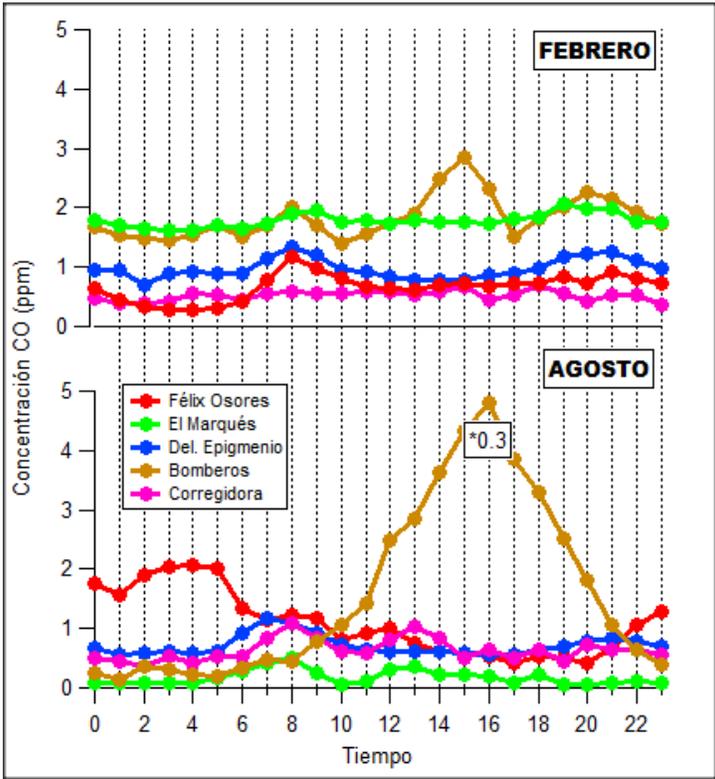


Ilustración 53. Muestra el ciclo diurno del monóxido de carbono obtenido durante los meses de febrero y agosto en el año 2013.

En la Tabla 10 se muestra el porcentaje de datos obtenido en cada mes y por cada estación para el monóxido de carbono. En el mes de febrero la única estación que no entra del rango de valores (80%-90%) es Corregidora con un 40%. Sin embargo, es uno de los porcentajes más altos obtenidos durante el año por esta estación. Para el mes de agosto no se puede acotar un rango de valores, ya que todos los porcentajes son muy distintos. Sin embargo, se eligió este mes ya que en él todas las estaciones contaban con datos y en para la mayoría es el porcentaje de datos más alto obtenido en la segunda mitad del año.

| Estación/Mes | Félix Osores | El Marqués | Del. Epigmenio | Bomberos | Corregidora |
|----------------|--------------|------------|----------------|----------|-------------|
| Febrero | 91% | 83% | 99% | 98% | 40% |
| Agosto | 63% | 24% | 100% | 86% | 53% |

Tabla 10 Porcentaje de datos obtenidos durante los meses de febrero y agosto.

Óxidos de nitrógeno: Los meses procesados para este contaminante fueron febrero y julio. En la parte superior de la Ilustración 54 se muestra el ciclo diurno obtenido con los datos del mes de febrero. En esta figura se observan dos picos de máxima concentración, el primero se presenta entre las 7:00 y las 9:00 horas. El segundo pico no se observa claramente en todas las estaciones, pero se presenta entre las 18:00 y las 21:00 horas. Una vez que se registra el primer pico hay una caída en el valor de las concentraciones, la cual dura hasta el comienzo del segundo pico. Posteriormente, la concentración desciende y se mantiene casi constante. La estación que presenta las concentraciones más altas es Bomberos, mientras que El Marqués muestra concentraciones bajas y constantes a lo largo del día.

En la parte inferior de la Ilustración 54 se muestra el ciclo diurno obtenido para el mes de julio. Se observan dos picos de alta concentración en todas las estaciones, excepto en Félix Osores donde las concentraciones permanecen casi constantes a lo largo del día. El primer pico se registró entre las 6:00 y las 8:00 horas, periodo en el que se presentan las concentraciones más altas. El segundo pico se observa entre las 19:00 y las 22:00 horas y no se visualiza con claridad en todas las estaciones. Entre los dos picos se observa un valle en el valor de las concentraciones. Sin embargo, no se puede establecer una hora del día donde la concentración sea mínima. Entre las 23:00 y las 5:00 horas el valor de la concentración permanece casi constante.

La Ilustración 54 muestra una comparación entre el ciclo diurno obtenido en los meses febrero y julio. Ambos meses presentan dos picos de alta concentración a lo largo del día, aunque en julio el segundo pico no es tan claro. Para las estaciones Del. Epigmenio y Corregidora, las concentraciones registradas en julio son mayores a las registradas en febrero.

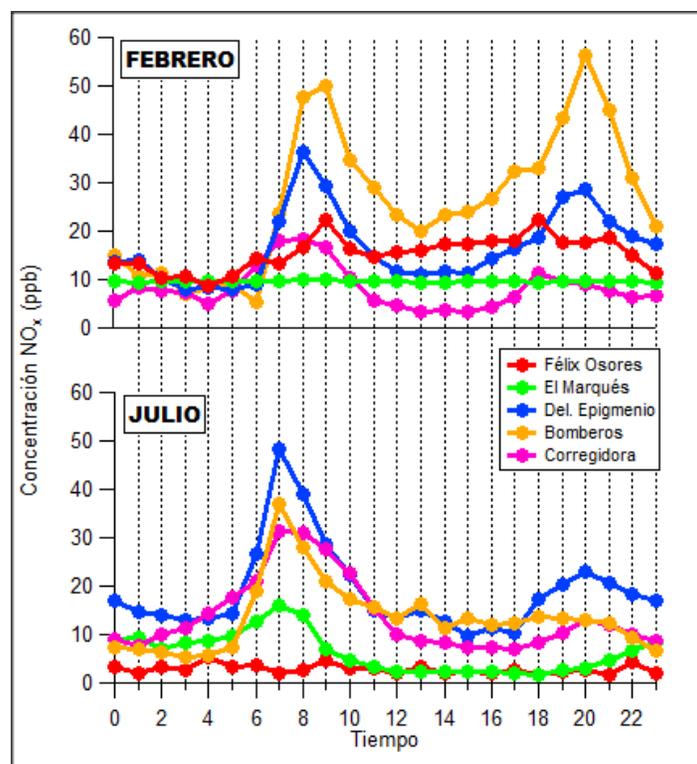


Ilustración 54. Muestra el ciclo diurno de los óxidos de nitrógeno obtenido durante los meses de febrero y julio para el año 2013.

En la Tabla 11 se muestra el porcentaje de datos obtenido en los meses de febrero y julio en cada estación de monitoreo. En el mes de febrero la mayoría de las estaciones cuenta con más del 90% de datos, excepto Corregidora que únicamente cuenta con el 54%. Sin embargo, es el segundo porcentaje más alto que obtuvo esta estación en la primera mitad del año. El rango de valores que establecen los porcentajes de datos obtenidos durante el mes de julio es más amplio. Aun así, este es el mes de la segunda mitad del año en el que todas las estaciones cuentan con datos. Además, la diferencia entre los porcentajes no es tan marcada como en otros meses del mismo periodo.

| Estación/Mes | Félix Osores | El Marqués | Del. Epigmenio | Bomberos | Corregidora |
|----------------|--------------|------------|----------------|----------|-------------|
| Febrero | 90% | 99% | 99% | 96% | 54% |
| Julio | 72% | 26% | 78% | 99% | 53% |

Tabla 11 Porcentajes de datos obtenidos durante el mes de febrero y julio.

Material Particulado <10 μ m: Únicamente dos estaciones, El Marqués y Del. Epigmenio, cuentan con registros de este contaminante y los datos obtenidos son muy pocos. En consecuencia, solo se procesaron los datos registrados en el mes de mayo. En la Ilustración 55 se muestra el ciclo diurno obtenido. En ambas estaciones puede observarse un pequeño aumento en el valor de las concentraciones entre las 6:00 y las 8:00 horas. En la estación Del. Epigmenio observamos una disminución en el valor de las concentraciones entre las 12:00 y las 16:00 horas. Después de este periodo la concentración aumenta hasta volverse casi constante (24 ppb) y permanecer así durante la madrugada. Por otro lado, en la estación El Marqués también observamos una disminución en el valor de las concentraciones, pero el cambio se da de manera gradual.

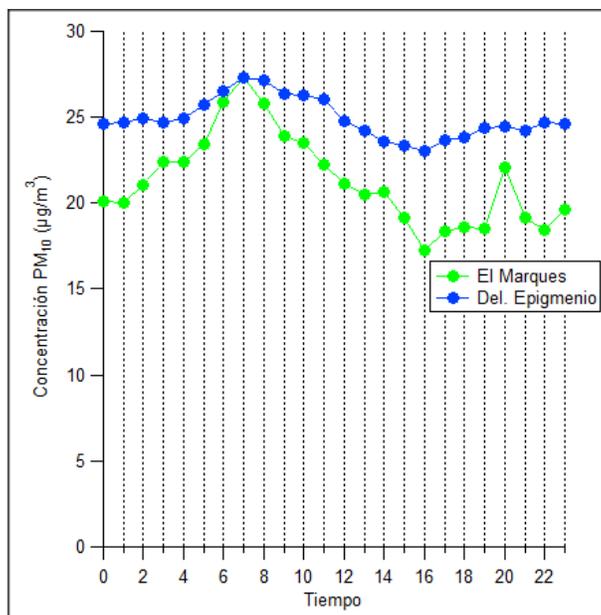


Ilustración 55. Muestra el ciclo diario del Material particulado <10µm durante el mes de mayo del año 2013.

En la Tabla 12 se muestran los porcentajes de datos obtenidos por cada estación para el mes de mayo. La estación El Marqués únicamente cuenta con registros en tres meses del año, mientras que Del. Epigmenio cuenta con 9 meses de datos. El mes de mayo fue el único donde el porcentaje de datos en ambas estaciones fue mayor a 90.

| Estación/Mes | Félix Osores | El Marqués | Del. Epigmenio | Bomberos | Corregidora |
|--------------|--------------|------------|----------------|----------|-------------|
| Mayo | --- | 93% | 98% | --- | --- |

Tabla 12. Muestra el porcentaje de datos obtenido en el mes de mayo para el material particulado <10µm

Material Particulado <2.5µm: Únicamente las estaciones Félix Osores y Bomberos cuentan con registros de este contaminante. Se procesaron los datos del mes de mayo y septiembre. En la parte superior de la Ilustración 56 se muestra el ciclo diario obtenido durante el mes de mayo. En éste no se observa un patrón a lo largo del día en ninguna de las dos estaciones. Por el contrario, la estación Félix Osores registra una concentración casi constante. Mientras que, Bomberos tiene un pico de alta concentración entre las 5:00 y las 7:00 horas. Posteriormente, el valor de la concentración va disminuyendo hasta que se registra un segundo pico de alta concentración, aunque no tan alto como el primero, entre las 13:00 y las 15:00 horas.

En la parte inferior de la Ilustración 56 se muestra el ciclo diario obtenido durante septiembre. Nuevamente, no se observa un patrón en ambas estaciones. La estación Bomberos tiene concentraciones mucho más altas que Félix Osores, siendo el máximo registrado de 74 ppb. Sin embargo, para poder analizar ambas estaciones en un mismo grafico fue necesario multiplicar las concentraciones de Bomberos por "0.3". La estación Bomberos registró concentraciones casi constantes a lo largo del día, mientras que en Félix Osores se observan dos picos de alta concentración. El primero pico se registró entre las 6:00 y las 8:00 horas, mientras que el segundo entre las 20:00 y las 23:00. Entre ambos picos observamos una disminución gradual en el valor de las concentraciones.

En la Ilustración 56 se muestra una comparación entre el ciclo diurno obtenido en mayo y septiembre. En ambos meses no se observa un comportamiento claro y homogéneo entre las estaciones. Por otro lado, las concentraciones registradas durante el mes de septiembre son más altas que las registradas en mayo, esto para ambas estaciones. Durante el mes de mayo, la estación Félix Osores muestra concentraciones casi constantes a lo largo del día, mientras que en el mes de septiembre pueden observarse dos picos de alta concentración. La estación Bomberos tuvo un comportamiento similar en ambos meses.

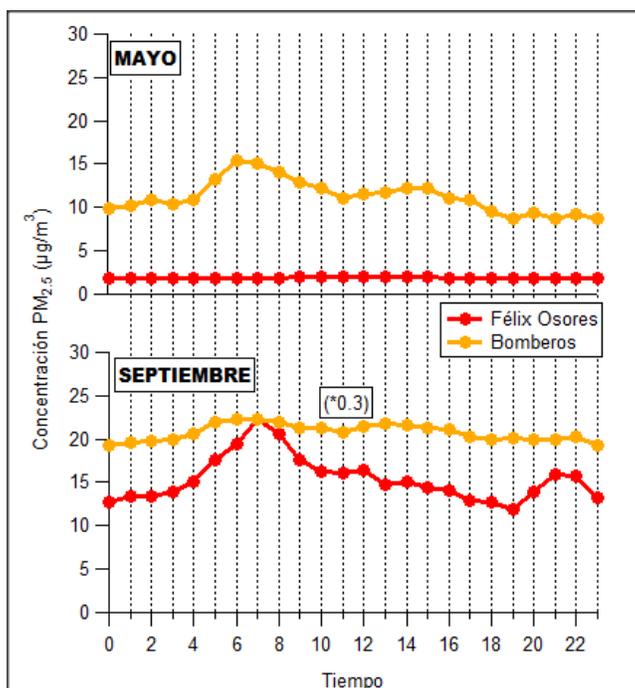


Ilustración 56. Muestra el ciclo diurno del material particulado $<2.5 \mu\text{m}$ para los meses de mayo y septiembre del año 2013.

La Tabla 13 muestra el porcentaje de datos obtenidos en cada mes por cada estación. En el mes de mayo ambas estaciones tienen más del 90%, mientras que en septiembre Bomberos cuenta con el 73 % de datos. Sin embargo, es el segundo porcentaje más alto obtenido por esta estación en la segunda mitad del año.

| Estación/Mes | Félix Osores | El Marqués | Del. Epigmenio | Bomberos | Corregidora |
|-------------------|--------------|------------|----------------|----------|-------------|
| Mayo | 99% | --- | --- | 97% | |
| Septiembre | 99% | --- | --- | 73% | |

Tabla 13. Muestra el porcentaje de datos obtenidos por cada estación en los meses de mayo y septiembre del año 2013.

7.3.2 Ciclos Semanales

Para poder realizar esta escala de tiempo se utilizaron los promedios diarios, se clasificaron según el día de la semana al que correspondía cada fecha, con ayuda del comando de Excel "DiaSem". Después se clasificaron por mes y finalmente se calculó el promedio de cada día. Posteriormente, al igual que con los ciclos diurnos, se identificaron los meses en los que las estaciones tuvieran un porcentaje de datos similar o dentro del mismo rango de valores. En consecuencia, nuevamente los meses analizados cambian según el contaminante. Es importante mencionar que este análisis se realizó con los promedios y no con las medianas (a diferencia de la sección 6.3.1), ya que no existen diferencias significativas entre ellos.

Ozono: Para este contaminante se analizaron los meses de febrero y agosto. En la Ilustración 57 se muestra el ciclo semanal del mes de febrero. Se puede observar un aparente aumento de la concentración de ozono los días miércoles y domingos, así como también una disminución el día jueves. Sin embargo, al agregar al gráfico los máximos y mínimos calculados para cada día en la estación El Marqués (líneas de color negro), encontramos que no existen diferencias evidentes entre los valores máximos obtenidos a lo largo de la semana. Este comportamiento se observa en todas las estaciones.

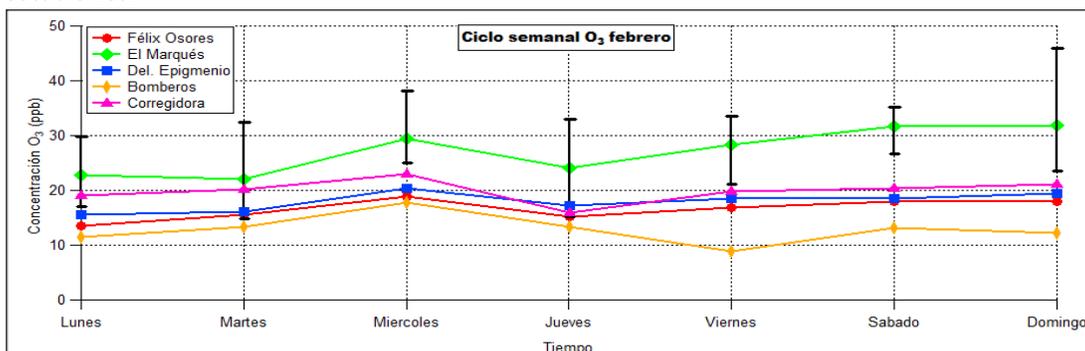


Ilustración 57. Muestra el ciclo semanal del ozono para el mes de febrero durante el 2013.

En la Ilustración 58 se muestra el ciclo semanal del mes de agosto. A diferencia del mes de febrero, no se observa un patrón. La estación con las concentraciones más bajas es Bomberos mientras que las concentraciones más altas las registra la estación El Marqués. En color negro se muestran los mínimos y máximos obtenidos para cada día de la semana en la estación Félix Osores. Nuevamente observamos que no existen diferencias significativas en estos valores, por lo que este comportamiento no es representativo de lo sucedido a lo largo de la semana.

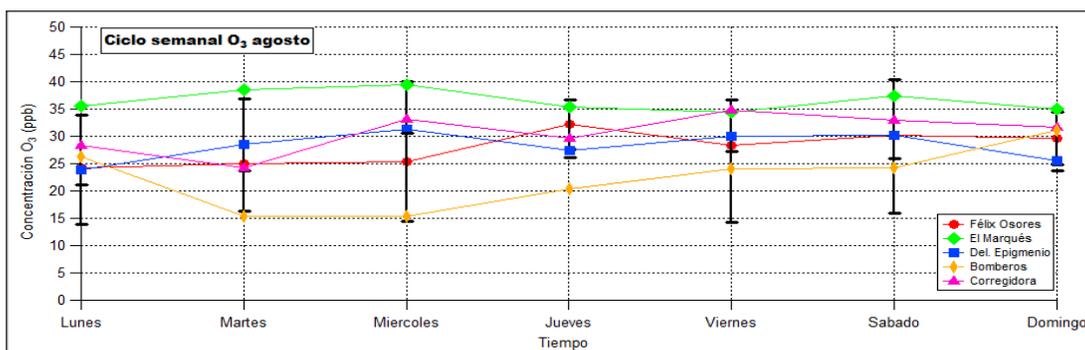


Ilustración 58. Muestra el ciclo semanal para el ozono en el mes de agosto del 2013.

Para el resto de los contaminantes se obtuvieron resultados similares a los del ozono, es decir, no se observa un patrón claro a lo largo de la semana. Además al agregar a los promedios calculados las concentraciones máximas y mínimas, no existe una diferencia significativa. Por lo que, no se consideró necesario realizar una descripción de cada gráfico obtenido. Los gráficos se pueden encontrar en la sección D de los anexos.

7.3.3 Comportamiento mensual

Este cálculo se realizó en base a los datos horarios, los cuales fueron clasificados por mes mediante la función *mes* del software Excel. Posteriormente, se calcularon los promedios de cada mes y se dividieron en dos categorías: promedios construidos con menos del 75% de datos horarios y promedios construidos con más del 75%.

Ozono: En la Ilustración 59 podemos observar los resultados obtenidos. Durante los primeros cuatro meses de año los promedios obtenidos permanecen dentro del mismo intervalo de concentración (7-20 ppb) en casi todas las estaciones excepto en El Marqués, donde el promedio es considerablemente más alto, incluso se observa un máximo en el mes de marzo. Durante los meses abril y mayo, el valor del promedio comienza a ascender alcanzando un máximo que varía entre el mes de julio y agosto según la estación. Éste comportamiento coincide con los meses que se encuentra dentro de la temporada de lluvia (temporada que se distingue por un cuadro en gris en la ilustración). Posterior a este máximo observamos una disminución gradual en el valor de los promedios, dicho comportamiento se prolonga hasta el mes de diciembre. Las estaciones que cuentan con la mayor cantidad de promedios construidos con más de 75% de datos horarios, son Félix Osores y el Del Epigmenio. Por el contrario, Corregidora y El Marqués tienen la menor cantidad de promedios que cumplen con esta característica.

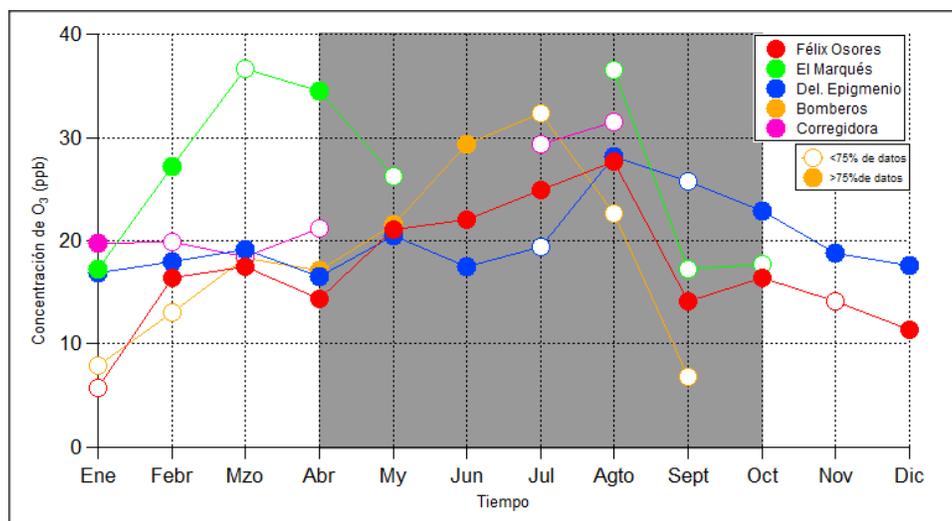


Ilustración 59. Muestra los promedios mensuales de O₃ obtenidos para cada estación. Los promedios que cuentan con más del 75% de datos horarios están representados por un círculo relleno, mientras que los que cuentan con menos del 75% de datos son círculos con fondo blanco. El área con fondo gris encierra la temporada de lluvias.

Dióxido de Azufre: Según los resultados obtenidos (Ilustración 60) durante la primera mitad del año los promedios de casi todas las estaciones son bajos y permanecen dentro de un rango de 0-5 ppb; excepto en la estación Bomberos, donde el promedio obtenido para el mes de enero se encuentra por arriba de los 5 ppb. Para este periodo de tiempo únicamente las estaciones Bomberos y Del. Epigmenio cuentan con promedios construidos con más del 75% de datos horarios. A partir del mes de julio se observa un aumento en el valor del promedio mensual, alcanzando valores de más de 10 ppb. Sin embargo, este comportamiento solo se observa en las estaciones Félix Osores, Del. Epigmenio y Bomberos, ya que son las únicas que cuentan con datos para la segunda mitad del año. Para este contaminante no se distingue un cambio en el valor de los promedios durante la temporada de lluvias. Los datos de la estación Del. Epigmenio fueron multiplicados por 0.5, esto con el fin de tener una única escala de concentración para todas las estaciones.

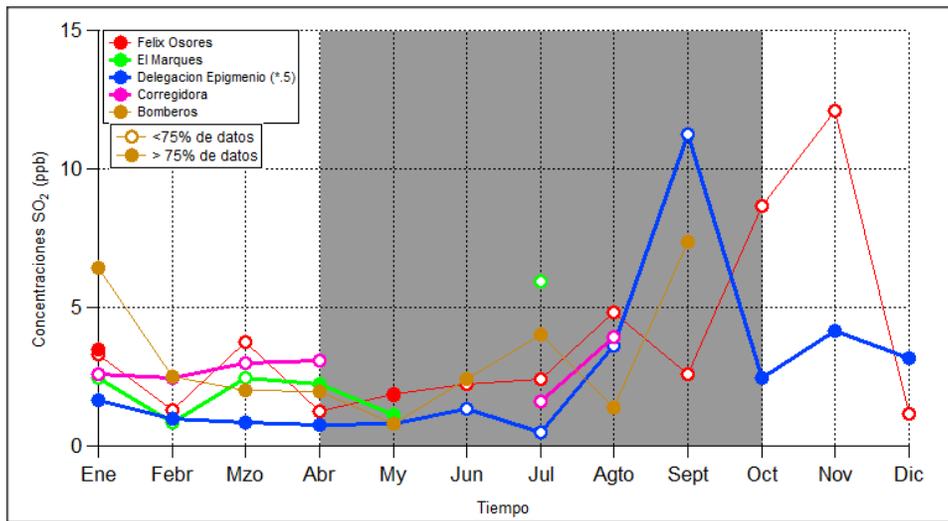


Ilustración 60. Muestra los promedios mensuales de SO_2 obtenidos para cada estación. Los promedios que cuentan con más del 75% de datos horarios están representados por un círculo relleno, mientras que los que cuentan con menos del 75% de datos son círculos con fondo blanco. El área con fondo gris encierra la temporada de lluvias.

Monóxido de Carbono: Los valores promedio obtenidos se muestran en la Ilustración 61. De forma general, no se observa un patrón similar para todas las estaciones a lo largo del año. Durante los primeros cuatro meses del año el valor de los promedios obtenidos se encuentra dentro un rango de concentración que va de 0 a 3 ppm. Posteriormente cada estación cuenta con valores promedio muy distintos. Durante los meses junio-julio en las estaciones Bomberos, Félix Osores y El Marqués, se observa un aumento en el valor promedio, el cual persiste hasta los últimos meses del año. En la estación Del. Epigmenio el valor del promedio disminuye mes con mes hasta llegar a octubre. La estación Corregidora únicamente cuenta con dos promedios para la segunda mitad del año, por lo que no se puede realizar un análisis de comportamiento. La estación con el mayor número de datos es Félix Osores, seguida de Del. Epigmenio y Bomberos.

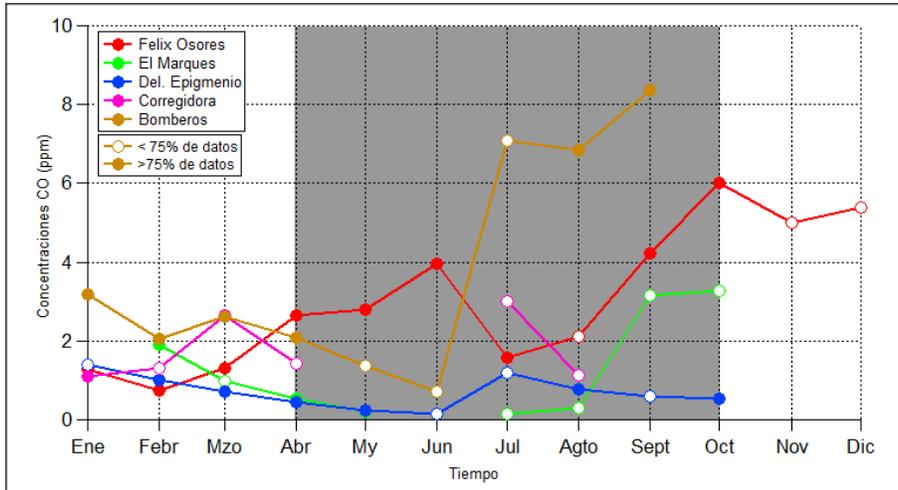


Ilustración 61. Muestra los promedios mensuales del CO obtenidos para cada estación. Los promedios que cuentan con más del 75% de datos horarios están representados por un círculo relleno, mientras que los que cuentan con menos del 75% de datos son círculos con fondo blanco. El área con fondo gris encierra la temporada de lluvias.

Óxidos de Nitrógeno: En la Ilustración 62, se observan dos comportamientos diferentes en los que se pueden agrupar a las estaciones de monitoreo. Por un lado, las estaciones Félix Osores y El Marqués muestran un aumento gradual en el valor promedio obtenido durante los meses de enero a marzo. Corregidora sigue un patrón similar con la excepción de que el aumento en el valor promedio comienza en el mes de febrero. Posteriormente, en el caso de Félix Osores y El Marqués, hay un descenso en el valor promedio, este comportamiento se mantiene hasta el mes de Junio, a partir del cual, nuevamente se observa un aumento. Por otro lado, las estaciones Del Epigmenio y Bomberos registran, durante los primeros tres meses del año, un descenso en el valor promedio. Posteriormente a partir del mes de julio se observa que el valor promedio aumenta hasta el mes de septiembre, que es el último promedio mensual con el que cuentan. Las estaciones que tienen la mayor cantidad de datos son Bomberos y Del. Epigmenio. La estación Corregidora es la que registró menos datos y estos solo se distribuyen en los primeros meses del año.

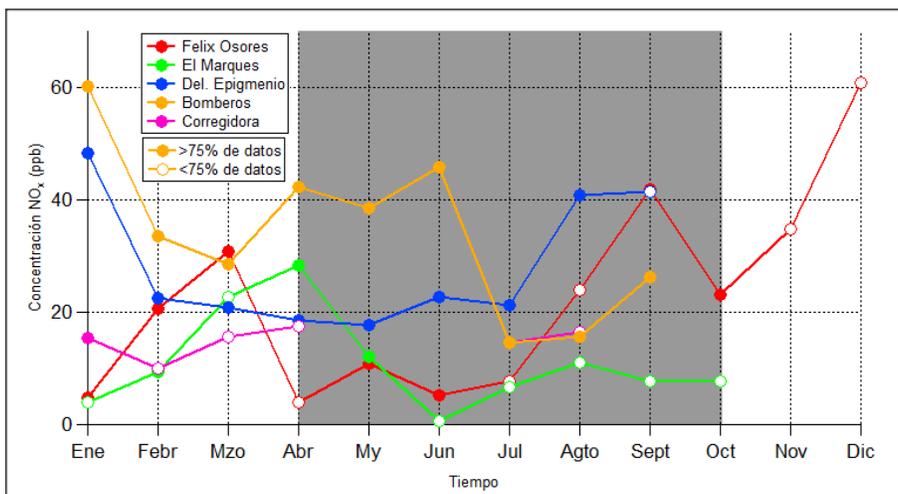


Ilustración 62. Muestra los promedios mensuales de los NOx obtenidos para cada estación. Los promedios que cuentan con más del 75% de datos horarios están representados por un círculo relleno, mientras que los que cuentan con menos del 75% de datos son círculos con fondo blanco. El área con fondo gris encierra la temporada de lluvias.

Material Particulado < 10 µm: La estación Del. Epigmenio muestra un comportamiento constante a lo largo del año. El valor promedio mensual de esta estación se mantiene dentro de un rango de concentración (20-25 µg/m³) desde el mes de abril y hasta diciembre. Por otro lado, la estación El Marqués únicamente cuenta con datos para los meses de abril, mayo y junio. En consecuencia, no se puede describir un patrón de comportamiento. Todo lo descrito anteriormente se puede observar en la Ilustración 63.

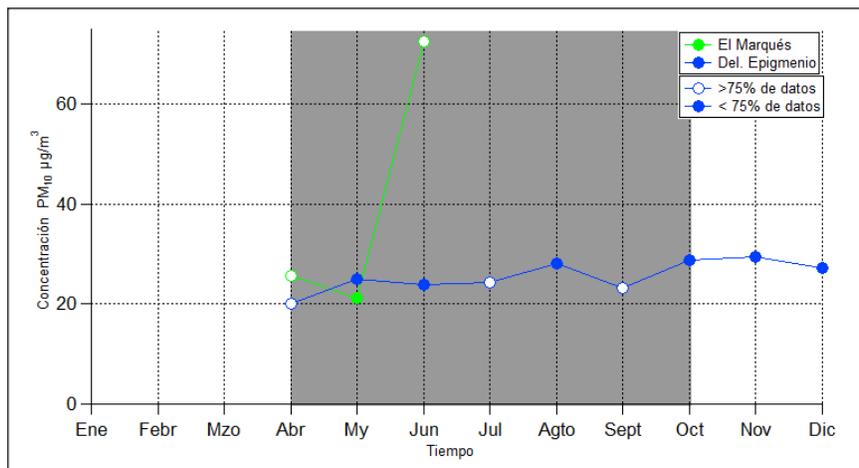


Ilustración 63. Muestra los promedios mensuales de PM₁₀ obtenidos para cada estación. Los promedios que cuentan con más del 75% de datos horarios están representados por un círculo relleno, mientras que los que cuentan con menos del 75% de datos son círculos con fondo blanco. El área con fondo gris encierra la temporada de lluvias.

Material Particulado < 2.5 µm: En la Ilustración 64 se muestran los promedios obtenidos para las estaciones Félix Osoreos y Bomberos. Ambas estaciones tienen un comportamiento similar, aunque los valores promedio de cada estación son muy distintos. Del mes de abril a junio, el valor promedio permanece dentro un intervalo constante. En julio el promedio aumenta, siendo en la estación Bomberos un cambio más significativo que el de Félix Osoreos. Este comportamiento permanece así hasta el último promedio calculado para cada estación.

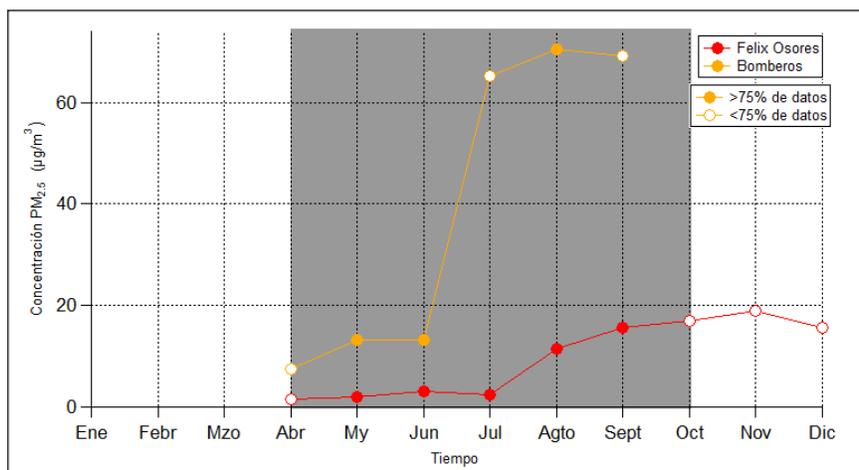


Ilustración 64. Muestra los promedios mensuales de PM_{2.5} obtenidos para cada estación. Los promedios que cuentan con más del 75% de datos horarios están representados por un círculo relleno, mientras que los que cuentan con menos del 75% de datos son círculos con fondo blanco. El área con fondo gris encierra la temporada de lluvias

7.4 Análisis temporal de las variables meteorológicas

Se procesaron únicamente los datos de 6 estaciones meteorológicas de la RedCIAQ. Éstas fueron elegidas de acuerdo a la cantidad de datos con los que contaban y a su cercanía con las estaciones de monitoreo de calidad del aire. En el Mapa 9 se muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas (marcas amarillas) y las estaciones de calidad del aire (figuras verdes) dentro de la zona de estudio.

Las variables meteorológicas procesadas fueron: dirección y velocidad del viento, precipitación, radiación solar, temperatura y humedad relativa. Éstas fueron seleccionadas debido a la relación y/o interacción que tienen con los contaminantes criterio.



Mapa 9. Ubicación de las estaciones meteorológicas y de calidad del aire dentro de la zona de estudio.

Según lo observado en el mapa, las estaciones de calidad del aire y meteorológicas se relacionaron entre sí. El criterio para establecer dicha relación fue la cercanía entre estaciones.

| Estación calidad del aire | Estación Meteorológica |
|---------------------------|-------------------------|
| Félix Osores | Chulavista |
| Del. Epigmenio | Belén y Real del Parque |
| El Marqués | Milenio |
| Corregidora | Candiles |
| Bomberos | Centro Histórico |

7.4.1 Radiación Solar: Con el fin de encontrar una relación entre esta variable y la concentración de ozono, se realizó el análisis en dos escalas de tiempo: promedios mensuales y ciclos diurnos.

Las estaciones meteorológicas registraron datos con valores diferentes de cero entre las 6:00 y las 19:00 horas, dependiendo la época del año. El resto de los datos fueron descartados al realizar los promedios correspondientes.

Promedios mensuales: En la Ilustración 65 se muestran los promedios mensuales obtenidos para las 6 estaciones de monitoreo; todas las estaciones muestran el mismo comportamiento. Durante los primeros cuatro meses la cantidad de radiación solar aumenta progresivamente hasta alcanzar un valor máximo en abril. El mayor incremento se da entre los meses de marzo y abril. Para el resto del año se observa una disminución paulatina. Por lo que, podemos concluir que la mayor cantidad de radiación solar se registra en el periodo de abril a agosto, meses que coinciden con las estaciones primavera-verano. El eje de las ordenadas en la Ilustración 65 no comienza en cero, ya que, esto permite observar de manera más detallada los datos.

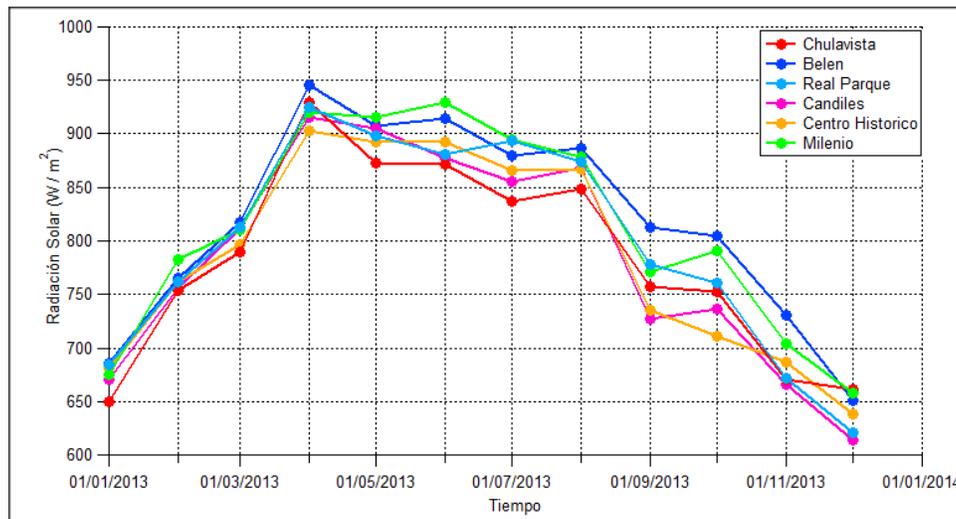


Ilustración 65. Muestra los promedios mensuales de radiación solar obtenidos para las 6 estaciones analizadas.

Ciclo diurno: Esta escala de tiempo se analizó para dos periodos diferentes a lo largo del año. El primero incluye los meses de enero y febrero y el segundo julio y agosto.

Para describir el comportamiento podemos dividir el día en dos partes: antes y después del mediodía. De las 7:00 a las 12:00 se observa un aumento constante en la cantidad de radiación solar medida. Aproximadamente a las 12:00 se registra el valor máximo y en las horas posteriores, hasta alrededor de las 19:00 horas, la radiación disminuye progresivamente. En la Ilustración 66 se observa que el comportamiento antes descrito se repite en ambos periodos de tiempo analizados y en todas las estaciones. La diferencia entre los dos periodos de tiempo es que, para los meses de julio y agosto el máximo de radiación solar se da a las 13:00 horas; es decir, una hora después en comparación con los meses enero y febrero, esto se debe al cambio de horario de verano.

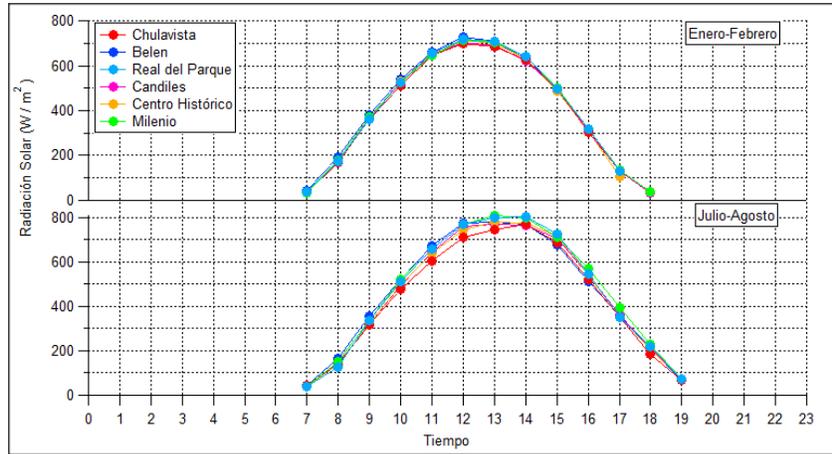


Ilustración 66. Muestra el ciclo diario obtenido para la radiación solar en las estaciones analizadas durante el 2013.

7.4.2 Precipitación: Para el procesamiento de esta variable se calcularon valores acumulados. Es decir, se sumaron todos los valores de precipitación registrados durante el periodo de tiempo a analizar, que en este caso fueron dos escalas: mensual y diario.

Precipitación acumulada mensual: Existen registros de precipitación durante todo el año, pero es hasta el mes de abril que éste comienza a ser relevante. Para el análisis de los contaminantes criterio se determinó que el periodo de lluvias abarcó de abril a octubre. Sin embargo, al analizar los datos de precipitación de las estaciones meteorológicas, podemos restablecer la temporada de lluvia como el periodo de mayo a noviembre. En este periodo de tiempo se observa un comportamiento bimodal, con un máximo en el mes de julio y otro en septiembre. En el mes de agosto se registró “la canícula”, que se refiere a una disminución en la cantidad de precipitación a mediados de la temporada de lluvias (SMN, 2014). En la Ilustración 67 se observa que casi todas las estaciones tienen el mismo comportamiento; con excepción de Real del Parque, donde el segundo pico de concentración máxima fue registrado hasta noviembre y la canícula se registró entre los meses de agosto y septiembre. La estación que registró la mayor cantidad de precipitación fue Milenio; el caso contrario fue Real del Parque. Por otro lado, la cantidad de precipitación registrada por el resto de las estaciones meteorológicas fue muy similar entre ellas.

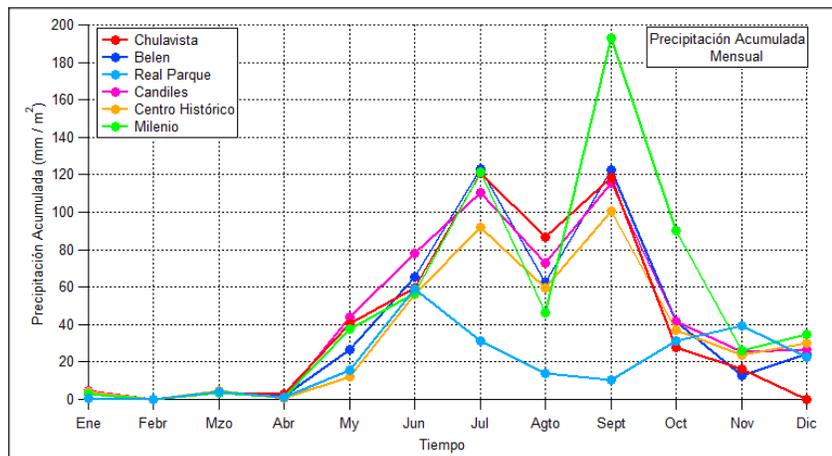


Ilustración 67. Muestra la precipitación acumulada mensual obtenida para las estaciones analizadas durante el 2013.

Precipitación acumulada, ciclo diurno: El análisis se realizó para dos periodos de tiempo diferentes. En el primero (enero-febrero), los registros de precipitación son pocos y no todas las estaciones cuentan con datos diferentes de cero. Además, los episodios de precipitación, suceden durante las primeras horas de la noche, entre las 18:00 y las 21:00. Para el segundo periodo de tiempo (julio-agosto), la cantidad de precipitación acumulada aumenta considerablemente. En la Ilustración 68 se observa que el lapso del día donde se registra la mayor cantidad de precipitación es durante la noche. Por el contrario entre las 5:00 y las 13:00 horas la precipitación es prácticamente cero para todas las estaciones, aunque los valores calculados para cada una no presentan el mismo patrón.

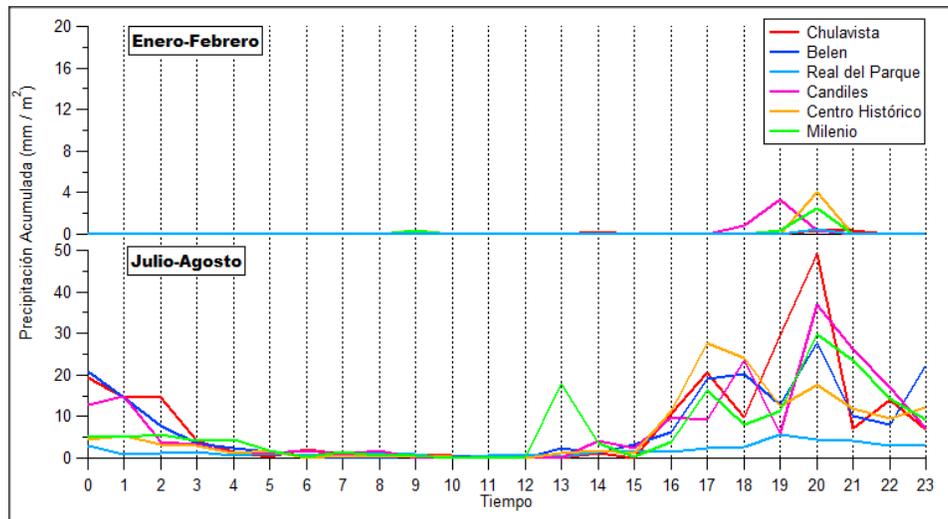


Ilustración 68. Muestra el ciclo diurno de la precipitación en dos periodos de tiempo (enero-febrero, julio-agosto) obtenido para las estaciones analizadas.

7.4.3 Dirección y velocidad del viento: Ambas variables se procesaron juntas y no se calcularon promedios a ninguna escala. Los datos de dirección de viento corresponden a la dirección de donde provienen los vientos al pasar por la estación de monitoreo. Se realizaron dos tipos de gráficos para todas las estaciones, el primero de ellos muestra el comportamiento de ambas variables a lo largo de todo el año. En el segundo gráfico se presentan los datos de dos periodos de tiempo diferentes (enero-febrero y julio-agosto) en rosas de viento. En la Ilustración 69 se muestra el primer tipo de gráfico obtenido, en él se representan todos los datos de dirección y velocidad del viento registrados a lo largo del año. Si bien se registraron vientos en todas las direcciones, en los primeros cinco meses se observan vientos predominantes del SW-NW (suroeste-noroeste). Para el resto del año los vientos más frecuentes provienen del NE-SE (noreste-sureste). La escala de colores del gráfico representa las velocidades del viento, la mayoría oscila entre los 2-4 km/h. En este rango de velocidades los vientos se consideran calmados.

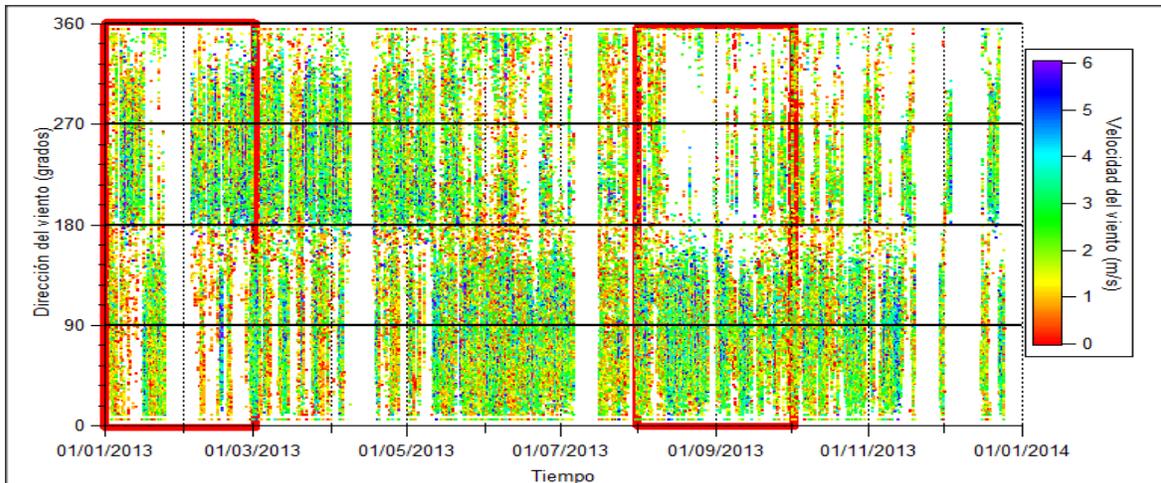


Ilustración 69. Muestra las direcciones y velocidades del viento registradas en la estación Chulavista durante el 2013. Los recuadros rojos enmarcan los datos seleccionados para realizar las rosas de viento.

El primer periodo de tiempo, enero-febrero, se muestra en la Ilustración 70. Las plumas representan las direcciones de viento, mientras que la longitud de éstas es equivalente a la frecuencia con la que fueron registradas (en porcentaje). La escala de colores corresponde a la velocidad del viento, siendo el color rojo la velocidad más baja. Para la estación Chulavista en este periodo de tiempo las direcciones son muy variadas, teniendo una mayor frecuencia las que se encuentran en las direcciones SW-NW, lo cual corresponde con lo representado en el gráfico anterior. El segundo periodo de tiempo (julio-agosto) se muestra en la Ilustración 71. Las direcciones de viento registradas son menos variadas en comparación con los meses de enero-febrero y las de mayor frecuencia se encuentran en la dirección N-NE. Con respecto a la velocidad del viento, el comportamiento es muy similar al observado durante los primeros meses del año, la mayoría de los vientos tiene una velocidad entre los 0 y 4 km/h.

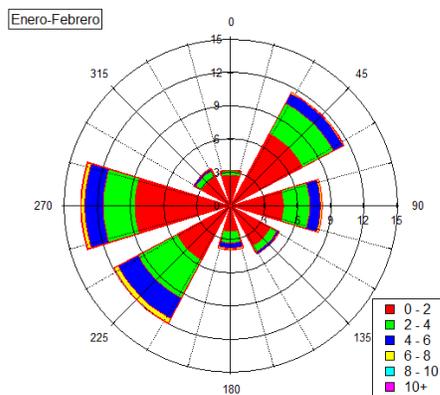


Ilustración 70. Rosa de viento obtenida en los meses de enero-febrero para la estación Chulavista

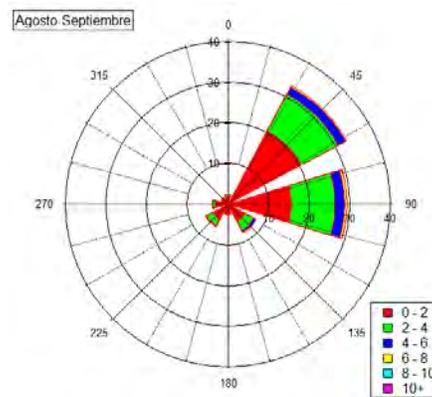


Ilustración 71. Rosa de vientos obtenida en los meses de julio-agosto para la estación Chulavista.

Los gráficos obtenidos para el resto de las estaciones se pueden encontrar en la sección E de los anexos. El comportamiento observado en todas las estaciones es similar, excepto para la estación Candiles, donde las direcciones de viento registradas son más variadas y con velocidades más bajas.

7.4.4 Humedad Relativa: En la Ilustración 72 se muestran los promedios mensuales obtenidos para todas las estaciones. Todas tienen el mismo comportamiento, durante los primeros 4 meses la cantidad de humedad desciende hasta alcanzar un mínimo en el mes de abril. De mayo a noviembre, periodo considerado como temporada de lluvia, observamos un aumento en la humedad. Éste es constante y concluye con un máximo en todas las estaciones. De octubre a noviembre, nuevamente hay un descenso, pero es menos abrupto en comparación con el observado a principio de año.

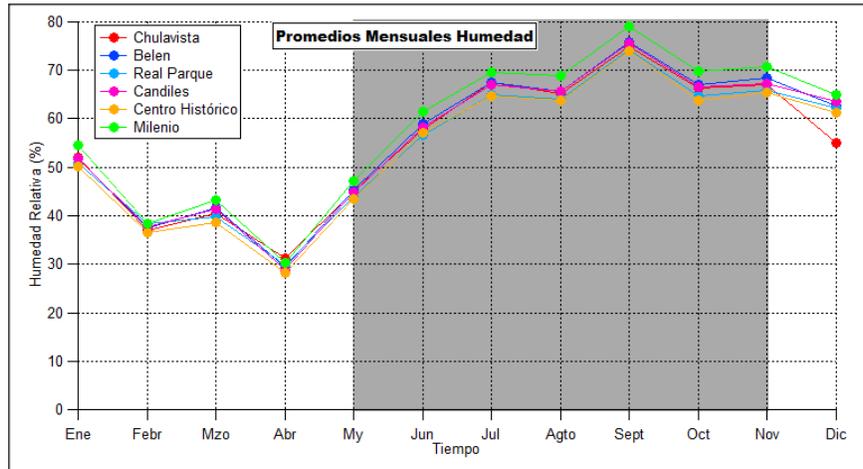


Ilustración 72. Muestra los promedios mensuales obtenidos durante el 2013, para la humedad relativa en las estaciones de monitoreo analizadas.

Humedad Relativa vs Precipitación: En la Ilustración 73 se muestra una comparación entre el comportamiento anual de la precipitación (eje de las ordenadas derecho) y el de la humedad relativa (eje de las ordenadas izquierdo). Durante los meses que abarcan el periodo de lluvia (mayo-noviembre) el comportamiento de ambas variables es similar para casi todas las estaciones. En ambas variables observamos un patrón bimodal con máximos en julio- septiembre y un mínimo en agosto, aunque en el caso de la humedad relativa no es tan claro. Para el resto del año existe una relación positiva entre ambas variables, es decir, a mayor cantidad de humedad, mayor cantidad de precipitación.

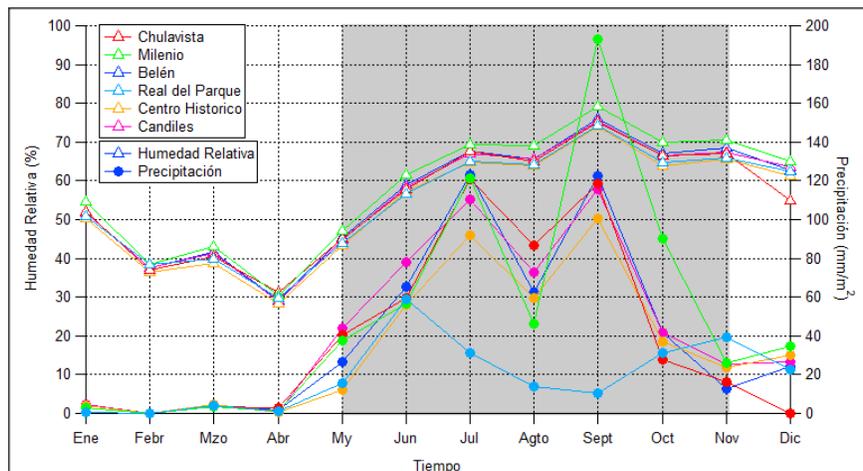


Ilustración 73. Muestra una comparación entre el comportamiento anual de la precipitación y la humedad relativa durante el 2013.

7.4.5 Temperatura: En la Ilustración 74 se muestran los promedios mensuales obtenidos para todas las estaciones. El periodo de tiempo donde se registran las temperaturas más altas va de abril a octubre, mientras que de octubre a diciembre se observa un descenso en el valor promedio. Por otro lado, de enero a febrero tenemos un aumento en el valor promedio. De febrero a marzo se registró un descenso, el cual coincide con un aumento en el valor promedio de la temperatura y la humedad relativa. Finalmente, al realizar una comparación entre la cantidad de radiación solar registrada y la temperatura, observamos que el comportamiento de ambas variables es muy similar excepto durante los primeros tres meses del año (Ilustración 75).

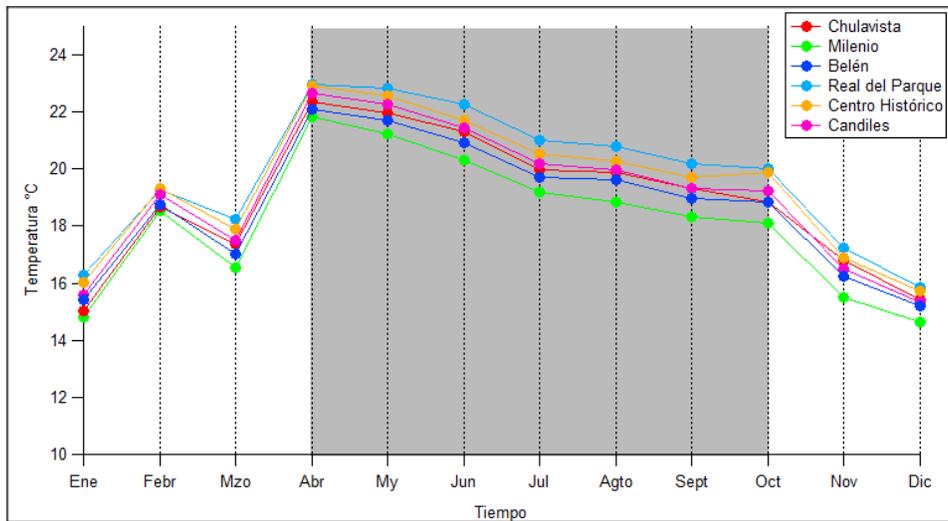


Ilustración 74. Muestra el comportamiento anual de la temperatura en las estaciones analizadas durante el 2013.

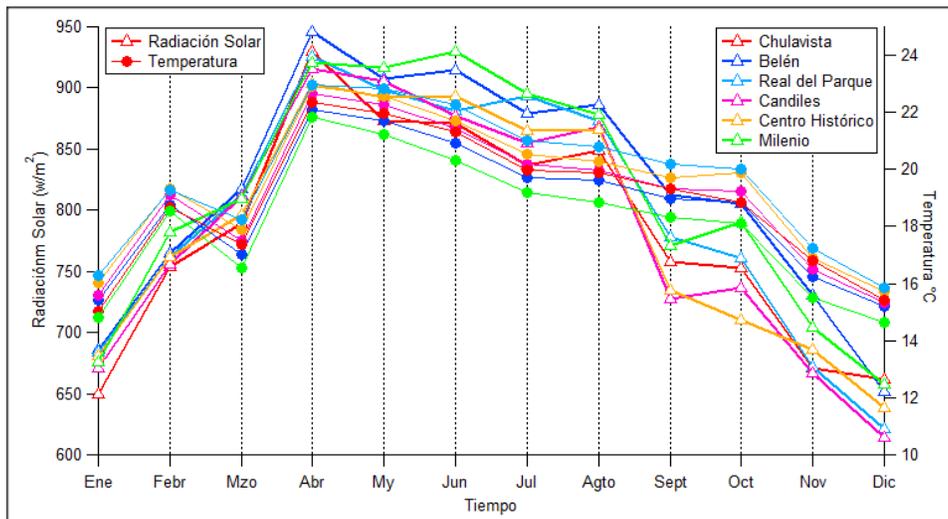


Ilustración 75. Muestra la comparación entre el comportamiento anual de radiación solar y temperatura durante el 2013.

7. 5 Asociación variables meteorológicas y concentración de contaminantes criterio

En esta sección se discutirá la relación entre el comportamiento temporal de las variables meteorológicas y los contaminantes criterio. El análisis se realizó a escala mensual para la mayoría de las variables meteorológicas, excepto para radiación solar, dirección y velocidad del viento.

7.5.1 Radiación Solar

Ozono vs Radiación Solar: El análisis de estas dos variables resulta importante debido a la relación positiva que existe entre la presencia de radiación solar y la formación de ozono (Lutgens & Tarbuck, 2013). La comparación entre estas dos variables se hizo para dos escalas de tiempo: comportamiento anual con promedios mensuales y ciclo diurno para dos periodos de tiempo diferentes.

En la Ilustración 76 se presenta el comportamiento mensual de cada una de las variables. Para realizar la comparación entre ozono y radiación solar, dividimos el año en tres periodos de tiempo. El primero periodo abarca los meses de abril a agosto (recuadro rojo). En éste observamos los promedios más altos de radiación solar además de un aumento progresivo en la concentración de ozono para casi todas las estaciones, excepto el Marques y Corregidora. De agosto a diciembre, el segundo periodo, se observa una disminución en los promedios de ambas variables. Por otro lado, en el tercer periodo de tiempo, de enero a abril, hay un aumento en los valores promedios de radiación solar y ozono.

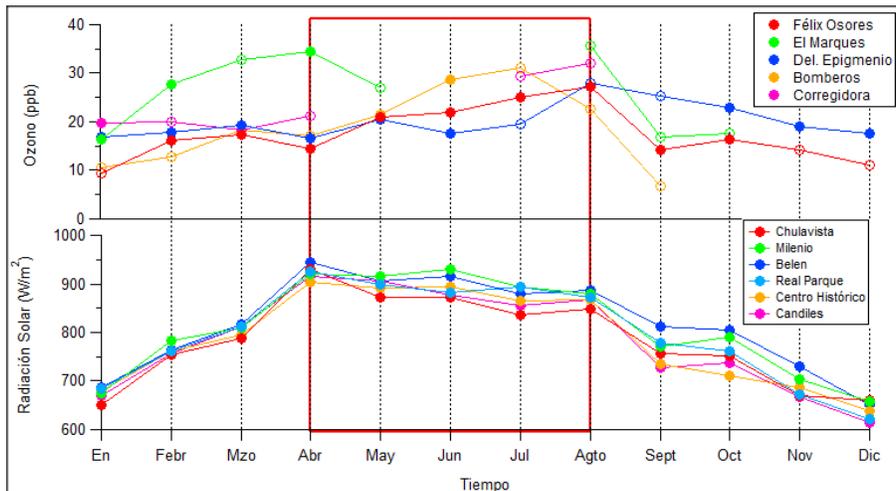


Ilustración 76. Muestra el comportamiento anual del ozono (parte superior) y la radiación solar (parte inferior) durante el 2013.

El primer periodo de tiempo analizado en ciclo diurno abarcó los meses de enero y febrero. En éste, se observa el mismo comportamiento en ambas variables: un aumento gradual en los valores promedio hasta alcanzar un máximo, posteriormente una disminución continua en los mismos. La diferencia entre las dos variables es la hora en la que ocurren los máximos. Ya que, para la radiación solar el máximo se da a las 12:00 del día, mientras que para el ozono éste se registra a las 15:00. El segundo periodo de tiempo analizado comprende los meses julio y agosto. En éste se presenta un patrón similar al de enero- febrero, pero los máximos de ambas variables solo difieren por una hora (radiación solar 12:00 y ozono 13:00). El desplazamiento en la hora de los máximos registrados para radiación solar y ozono puede asociarse al tiempo que tarda en formarse el contaminante.

El hecho de que este desplazamiento de máximos entre ambas variables sea mayor en enero y febrero, puede deberse a la época del año. Es decir, ya que es invierno, la cantidad de radiación solar que llega a la superficie es menor, por lo que, el tiempo de formación de ozono será mayor. En la Ilustración 77 se muestra el ciclo diurno de ambas variables para los dos periodos de tiempo. Se observa que los promedios máximos obtenidos, para ambas variables, durante el periodo de julio-agosto son más altos que los calculados el periodo enero-febrero. Para la radiación solar el aumento varía del 7% al 11% según la estación (Tabla 14). Para el ozono el aumento varía entre el 17% y el 48% (

Tabla 15).

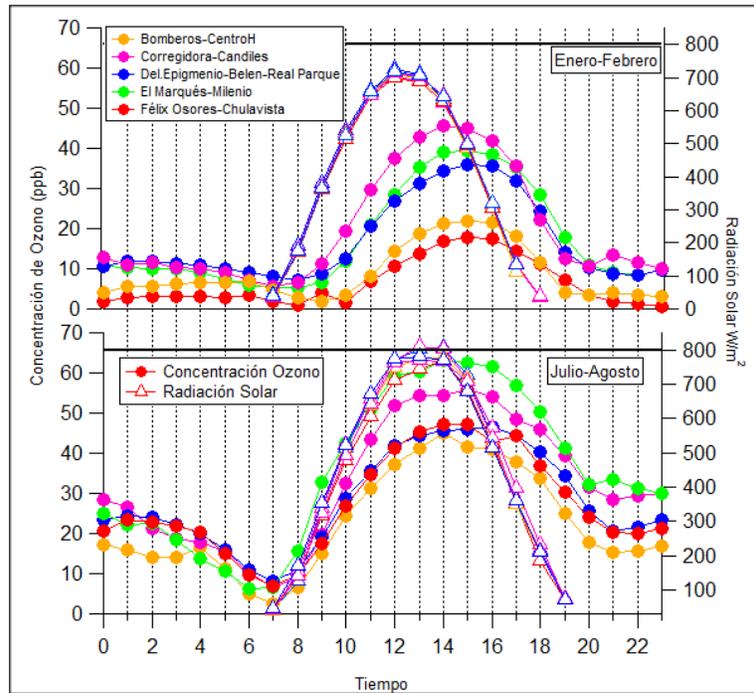


Ilustración 77. Muestra la comparación del ciclo diurno del ozono y la radiación solar para dos periodos de tiempo distintos a lo largo del año. El eje "y" izquierdo señala la concentración de ozono, el derecho a la radiación solar. La línea negra marca el valor máximo obtenido de radiación solar.

Tabla 14. Muestra los máximos obtenidos para la radiación solar en enero y agosto, así como la hora en la que se registraron, además del porcentaje de diferencia entre estos.

| Estación | Radiación Solar | | | | Δ [Máx.] |
|------------------|-----------------|-------|--------|-------|-----------------|
| | Enero | | Agosto | | |
| | [Máx] | Hora | [Máx] | Hora | |
| Chulavista | 699.2 | 12:00 | 769.8 | 14:00 | 9.17% |
| Milenio | 712.6 | 12:00 | 809.2 | 13:00 | 11.93% |
| Belén | 726.2 | 12:00 | 781.4 | 13:00 | 7.06% |
| Real Parque | 719.03 | 12:00 | 805.7 | 14:00 | 10.70% |
| Centro Histórico | 711.3 | 12:00 | 777.9 | 13:00 | 8.56% |

| | | | | | |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Candiles | 701.5 | 12:00 | 769.7 | 13:00 | 8.85% |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|

Tabla 15. Muestra los máximos obtenidos para el ozono en enero y agosto, así como la hora en la que se registraron, además del porcentaje de diferencia entre estos.

| Ozono | | | | | |
|----------------|-------|-------|--------|-------|-----------------|
| Estación | Enero | | Agosto | | Δ [Máx.] |
| | [Máx] | Hora | [Máx] | Hora | |
| Félix Osores | 17.78 | 15:00 | 47.29 | 14:00 | 18.16% |
| El Marqués | 39.24 | 15:00 | 63.07 | 14:00 | 37.78% |
| Del. Epigmenio | 35.86 | 15:00 | 46.71 | 16:00 | 23.22% |
| Bomberos | 21.92 | 15:00 | 45.11 | 14:00 | 51.40% |
| Corregidora | 45.49 | 14:00 | 55.86 | 15:00 | 18.56% |

No se espera que la radiación solar tenga influencia en las concentraciones del resto de los contaminantes criterio (monóxido de carbono, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y material particulado), por lo que no se realizó un análisis entre estas variables.

7.5.2 Precipitación

El material particulado y el dióxido de azufre tienen una relación directa con la precipitación, debido a que una de las formas de remoción de ambos contaminantes es el depósito húmedo (Jacobson, 2002). Por lo que, al realizar el análisis comparativo se esperaba que con el incremento de la cantidad acumulada de precipitación se registraría una disminución en la concentración de material particulado y dióxido de azufre. Sin embargo, esto no sucede. En algunas estaciones, incluso, puede observarse un incremento en la concentración.

PM₁₀ vs precipitación: En la Ilustración 78 se muestra la comparación del comportamiento mensual de ambas variables. El análisis se realizó únicamente para las estaciones Del. Epigmenio y El Marques, debido a que son las únicas que cuentan con datos de PM₁₀. Las estaciones meteorológicas que se encuentran cerca de éstas son Milenio, Real del Parque y Belén. La estación El Marques tiene únicamente 3 promedios mensuales, por lo que no es posible establecer una relación con la

precipitación. Por otro lado, la estación Del. Epimgenio cuenta con datos para más de la mitad del año, pero el valor de los promedios calculados no presenta variaciones significativas. Esto a pesar del aumento en la cantidad de precipitación durante la segunda mitad del mismo.

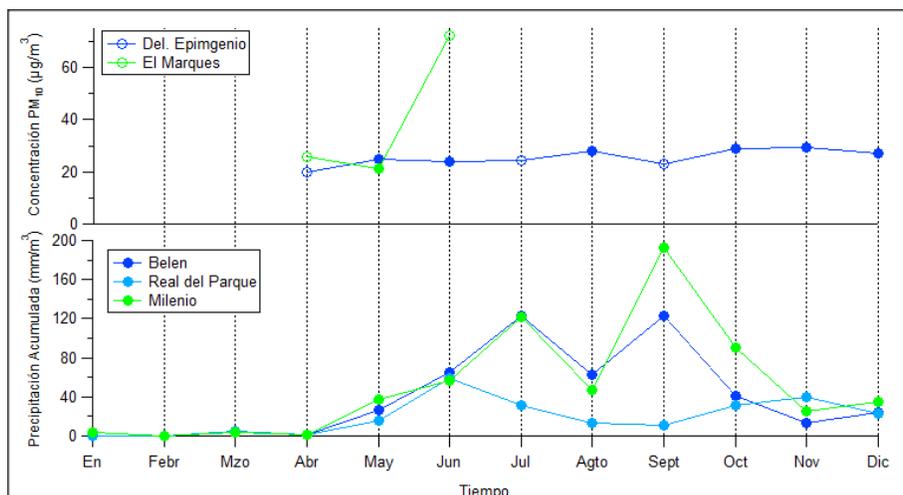


Ilustración 78. Muestra la comparación, a escala mensual, entre la concentración de PM₁₀ (parte superior) y la precipitación (parte inferior), durante el año 2013.

PM_{2.5} vs Precipitación: El análisis se realizó para las estaciones Félix Osores y Bomberos, ya que son las únicas que cuentan con datos de PM_{2.5}. El comportamiento de los promedios mensuales obtenidos para ambas estaciones es muy diferente entre sí y en ninguno de los casos hay una relación con la precipitación. Las estaciones meteorológicas más cercanas fueron Chulavista y Centro Histórico.

En la estación Bomberos se observa un aumento en la concentración de PM_{2.5} a partir del mes de junio y hasta septiembre. Este comportamiento es contrario al teórico, ya que esperábamos observar una disminución en la concentración de PM_{2.5} debido al aumento de la cantidad de precipitación en el mismo periodo de tiempo. Sin embargo, hay que recordar que los datos de esta estación fueron clasificados como poco confiables debido al cambio de línea base en los mismos. En consecuencia no se puede llegar a una conclusión.

Para la estación Félix Osores sucede exactamente lo mismo, pero el incremento en la concentración se registra a partir del mes de julio. Lo antes descrito se muestra en la Ilustración 79.

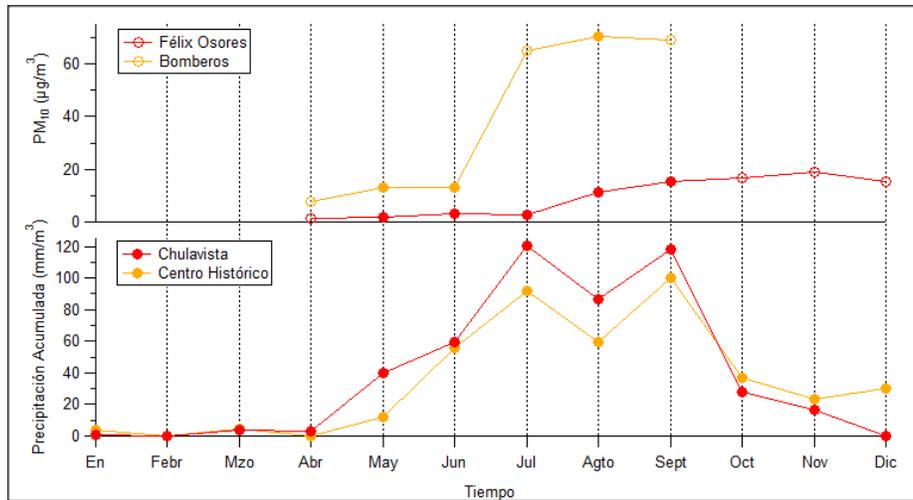


Ilustración 79. Muestra el análisis mensual realizado para $PM_{2.5}$ (parte superior) y precipitación (parte inferior) durante el 2013.

Dióxido de Azufre vs Precipitación: El depósito húmedo es un sumidero importante para el dióxido de azufre, cuando este ya ha sido oxidado dentro de la atmósfera. Sin embargo, el proceso de oxidación se acelera en presencia de humedad o gotas de lluvia (Warneck, 2000). Es por esto que se espera una relación inversa entre la concentración de dióxido de azufre y la precipitación; es decir, a mayor cantidad de precipitación, menor concentración de dióxido de azufre. En la Ilustración 80 se muestra el comportamiento mensual del dióxido de azufre así como de la precipitación. Se observa que no existe dicha relación inversa entre ambas variables.

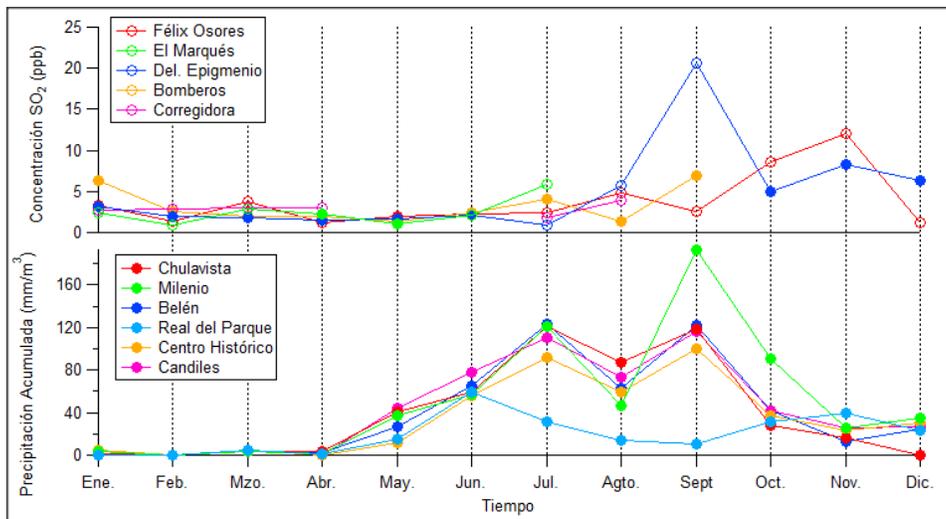


Ilustración 80. Muestra el análisis mensual realizado para SO_2 (parte superior) y precipitación (parte inferior) durante el 2013.

7.5.3 Humedad Relativa

Esta variable únicamente se comparó con el comportamiento mensual del Dióxido de Azufre, debido a que éste se oxida más rápido en presencia de humedad (Warneck, 2000). En la Ilustración 81 se muestra la comparación entre el comportamiento mensual de ambas variables. Teóricamente, si la

humedad relativa aumenta debemos observar una disminución en la concentración de dióxido de azufre. Sin embargo, esto no sucede en el área de estudio, por el contrario, durante los meses donde tenemos los máximos valores de humedad relativa (junio-diciembre) se registró un aumento en la concentración del dióxido de azufre. La relación observada entre estas dos variables es muy similar a la que existe entre el dióxido de azufre y la precipitación.

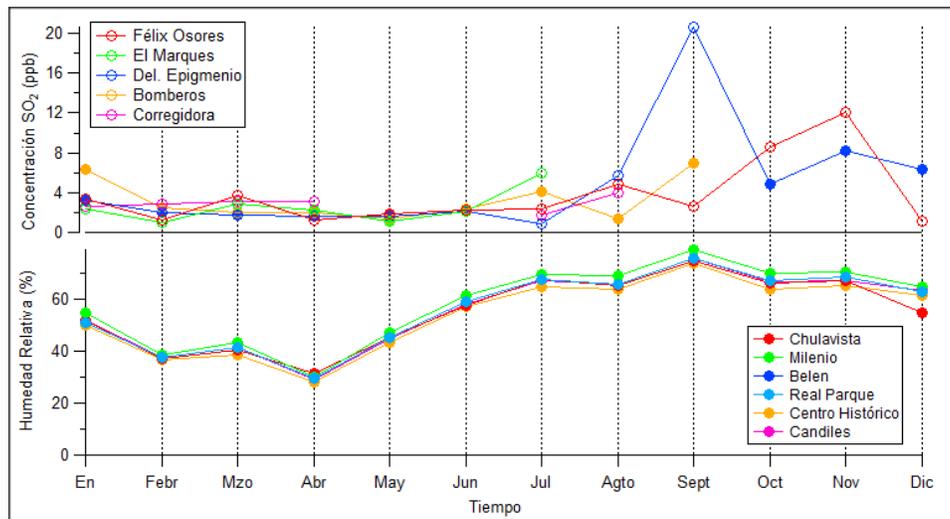
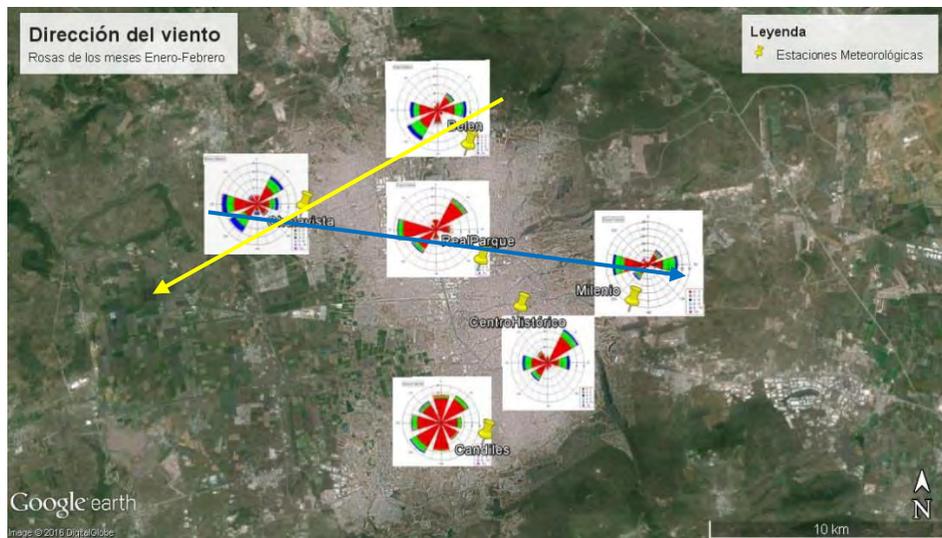


Ilustración 81.. Muestra la comparación del comportamiento mensual del SO₂ (parte superior) y la humedad relativa (parte inferior) durante el 2013.

7.5.4 Dirección y velocidad del viento

Para encontrar la relación entre estas variables y la concentración de los contaminantes criterio en las diferentes estaciones, se trazó el patrón de vientos dominantes durante dos periodos del año mediante el uso de las rosas de viento.

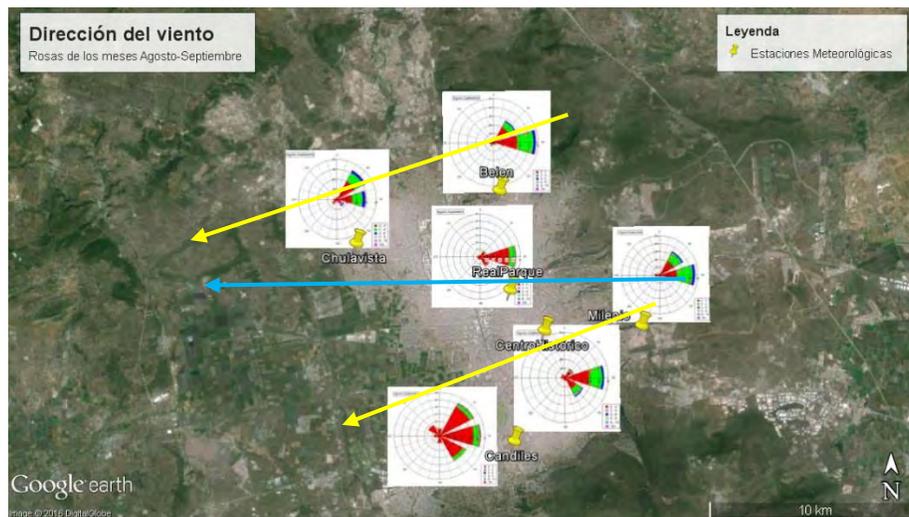
El primer periodo abarcó los meses de enero-febrero, cuyos resultados se muestra en el Mapa 10. Se observa una gran variabilidad en las direcciones del viento registradas, lo cual dificulta obtener un patrón de vientos predominantes. Sin embargo, se encontraron dos direcciones cuya frecuencia es alta en la mayoría de las estaciones analizadas. La primera dirección (representada por una flecha azul en el mapa) viene del oeste (W) hacia el este (E) y se observa con mayor frecuencia en las estaciones Chulavista, Real del Parque y Milenio. La segunda dirección viene del noreste (NE) hacia el suroeste (SW). Esta dirección se observa con mayor frecuencia en las estaciones Chulavista, Belén, Real del Parque, Centro Histórico y Candiles, en el mapa se representa con una flecha amarilla. Con respecto a las velocidades del viento, la mayoría no rebasa los 2km/h, aunque se registran con poca frecuencia vientos que alcanzan los 8 km/h. Las velocidades más altas del viento se registran entre las 12 y las 18 horas del día, para la mayoría de las estaciones.



Mapa 10. Muestra los patrones de dirección del viento para los meses de enero-febrero del año 2013.

El segundo periodo de tiempo abarco los meses de agosto y septiembre, en donde la variabilidad en las direcciones de viento es menor en comparación con enero y febrero. En el Mapa 11 se muestran los patrones de dirección obtenidos en este periodo. El primer patrón va de este a oeste (E-W) y tiene una alta frecuencia en todas las estaciones meteorológicas. Dentro del mapa se representa con una flecha azul. El segundo patrón va de noreste a suroeste (NE-SW), su frecuencia es alta únicamente en las estaciones Chulavista, Belén, Candiles y Milenio, se representa con flechas amarillas dentro del mapa.

Las velocidades del viento oscilan entre los 2 y 6 km/h. Sin embargo, los vientos de mayor frecuencia tienen una velocidad entre los 2 y 4 km/h. Si comparamos este patrón de velocidades con el obtenido en los meses de enero y febrero, podemos decir que para agosto-septiembre los vientos son más calmados. Por lo que, teóricamente esperamos una menor dispersión de contaminantes para estos meses (Lutgens & Tarbuck, 2013). Las velocidades del viento permanecen constantes durante el día, a diferencia de los meses enero y febrero, donde se observa un aumento de la velocidad durante la tarde.



Mapa 11. Muestran los patrones de dirección de viento para los meses agosto y septiembre del año 2013.

Con base en los patrones de dirección encontrados para ambos periodos de tiempo (enero-febrero y agosto-septiembre), se realizó una comparación con las concentraciones mensuales obtenidas para los contaminantes criterio. Esto con el propósito de encontrar una posible explicación al comportamiento espacial de los mismos. Ya que, teóricamente, el viento transporta la contaminación, esperamos que la estación que se localiza primero en la dirección que éste sigue, sea la que registre concentraciones menores. De esta forma, conforme el viento avance, las estaciones siguientes deben tener valores de concentración más altos. Finalmente, la estación que se localiza al final de la trayectoria que el viento sigue sea la que tenga las concentraciones más altas. En consecuencia, para los meses enero-febrero, según el patrón de dirección de viento, las concentraciones más altas se deberían registrar en las estaciones El Marques y Bomberos, mientras que Félix Osoreo debería registrar las concentraciones más bajas. Por otro lado, para los meses agosto y septiembre se esperaría que las concentraciones más altas se encontraran en las estaciones Félix Osoreo y Corregidora, mientras que las más bajas en la estación el Marqués. A continuación se describe el comportamiento espacial de cada contaminante por periodo de tiempo.

Enero- febrero:

Ozono: En todas las estaciones se observa un aumento en el valor promedio de las concentraciones de un mes a otro. Por otro lado, las concentraciones más altas durante este periodo de tiempo se encontraron en la estación El Marques, seguida de Corregidora, Del. Epigmenio, Félix Osoreo y Bomberos. Este comportamiento no coincide con el esperado de acuerdo a los patrones de dirección del viento, ya que teóricamente, la estación Bomberos debería tener una de las concentraciones más altas.

Monóxido de Carbono: Las estaciones con los promedios mensuales más altos son Bomberos y El Marques, seguidos por Corregidora, Del. Epigmenio y Félix Osoreo, este comportamiento coincide con el trazado por el patrón de dirección del viento.

Dióxido de azufre: El patrón trazado por las direcciones de viento no se cumple, ya que, la estación con la concentración más alta es Bomberos, seguida por Corregidora, Félix Osoreo, Del Epigmenio y El Marques.

Óxidos de nitrógeno: Durante enero y febrero las estaciones que cuentan con los promedios más altos son Bomberos y Del. Epigmenio, seguidas de Corregidora, Félix Osoreo y El Marqués. En consecuencia no se sigue el patrón trazado por las direcciones del viento.

PM₁₀: Para este contaminante no se realizó el análisis comparativo entre el comportamiento espacial y el patrón trazado por las direcciones de viento, debido a que no se contó con datos suficientes de concentración.

PM_{2.5}: Las estaciones Bomberos y Félix Osoreo son las únicas que cuentan con registros de este contaminante y lo hacen a partir del mes de abril. Por lo que, no se realizó el análisis comparativo para este periodo de tiempo.

Agosto-Septiembre

Ozono: Se observa una disminución en el valor de los promedios calculados de agosto a septiembre en todas las estaciones. Sin embargo, el patrón esperado no se cumple, ya que Del Epigmenio y El Marques cuentan con los promedios más altos, seguidos por Félix Osos y Bomberos. Mientras que, según el patrón de dirección, las concentraciones más altas deberían registrarse en Félix Osos.

Monóxido de Carbono: Los promedios más altos son los de la estación Bomberos. Sin embargo, estos datos no parecían correctos debido a un aumento en la línea base de los mismos. La segunda estación con los promedios más altos es Félix Osos, seguida por El Marques y finalmente Del. Epigmenio. Por lo que, podemos concluir que el patrón de concentración coincide con el marcado por la dirección del viento.

Dióxido de Azufre: Únicamente tres estaciones cuentan con datos. En el mes de agosto, la estación con el promedio más alto es Félix Osos, seguida de Del. Epigmenio y Bomberos, lo cual sigue el patrón de comportamiento trazado por las direcciones de viento. Sin embargo, para el mes de septiembre, el patrón ya no se cumple ya que Del. Epigmenio y Bomberos cuentan con los valores promedio más altos.

Óxidos de nitrógeno: Los promedios más bajos corresponden a El Marques y Bomberos, mientras que Félix Osos y Del. Epigmenio tiene los promedios más altos. Esto corresponde con el patrón trazado por la dirección del viento. La estación Corregidora no cuenta con datos para este periodo de tiempo, por lo que no se incluye en el análisis.

PM₁₀: Al igual que en enero y febrero, no se realizó el análisis comparativo entre el comportamiento espacial y el patrón trazado por las direcciones de viento. Esto debido a que no se contó con datos suficientes de concentración.

PM_{2.5}: No existe una relación entre el comportamiento espacial de PM_{2.5} y el patrón trazado por la dirección de viento, ya que contrario a lo esperado, la estación Bomberos tiene promedios de concentración más altos que Félix Osos.

8. Discusión

De acuerdo a lo descrito en la sección de resultados, existe una relación positiva entre la radiación solar y la concentración de ozono; lo cual coincide con la teoría. En el caso de la radiación solar, todas las estaciones presentaron un comportamiento muy similar a lo largo del año. Por el contrario, en la concentración de ozono si bien las estaciones tienen un patrón general semejante, el comportamiento entre ellas es muy variado. Lo que nos sugiere que la concentración de ozono se ve afectada por otros factores meteorológicos además de la cantidad de radiación solar.

No se encontró una relación inversa entre la precipitación y la concentración de material particulado y dióxido de azufre.

Durante la temporada de lluvia, la concentración de material particulado permanece constante, inclusive se observó un incremento en la misma. Esto puede ser consecuencia de varios factores: entre ellos la falta de registros de las estaciones de calidad del aire, además de la dudosa calidad de los mismos. Por otro lado, existen otras variables ambientales que afectan la concentración del material particulado en la atmósfera, tales como: dirección y velocidad del viento, la presencia de vegetación que favorece el depósito seco, el proceso de nucleación del vapor de agua, entre otros (Lutgens & Tarbuck, 2013).

En el caso del dióxido de azufre, contrario a lo esperado, la concentración de este contaminante aumenta su valor promedio en la mayoría de las estaciones a partir del mes de julio y hasta diciembre. Durante estos meses también se observa un aumento en la precipitación.

Lo mismo sucede entre el dióxido de azufre y la humedad relativa, ya que, existe una relación positiva entre ambas variables.

La velocidad y dirección del viento no tienen el mismo impacto en todos los contaminantes, lo cual se puede asociar las propiedades físicas y químicas individuales y a que cada uno tiene diferentes sumideros. Sin embargo, se sabe que tanto la velocidad como la dirección del viento, juegan un papel importante en la dispersión de los contaminantes. Me parece que, la falta de datos de calidad del aire a lo largo del año, es la causa por la cual no se observa una relación más directa entre la concentración de los contaminantes criterio y el viento. Ya que, el análisis de únicamente dos periodos de tiempo muy cortos, no permite realizar una comparación temporal adecuada. Además hay que tomar en cuenta las barreras orográficas y urbanas que pueden afectar la concentración de contaminación que lleva el viento.

9. Conclusiones

9.1 Cumplimiento de la normatividad oficial mexicana

La Tabla 16 resume el cumplimiento de la normatividad en las cinco estaciones para los seis contaminantes criterio. La Tabla 17 presenta el significado de la simbología usada en la Tabla 16. De manera general, el rendimiento anual de las estaciones es malo (la estación con mejor rendimiento es Del. Epigmenio (70% de datos) y la estación con el peor rendimiento es Corregidora (30% de datos). Esta situación limita el análisis de la calidad del aire, ya que no siempre es posible establecer si las estaciones cumplen con la normatividad oficial mexicana. Es de hacer notar que las concentraciones de CO rebasan la norma en todas las estaciones y el O₃ en dos de ellas (El Marqués y Bomberos).

| Estación/ Contaminante | O ₃ | NO ₂ | SO ₂ | CO | PM ₁₀ | PM _{2.5} |
|---------------------------|----------------|-----------------|-----------------|----|------------------|-------------------|
| Félix Osoros | ✓ | ? | ? | X | --- | ? |
| El Marqués | X | ? | ? | X | ? | --- |
| Del. Epigmenio | ✓ | X | ✓ | X | ? | --- |
| Bomberos | X | ? | ? | X | --- | X |
| Corregidora | ? | ? | ? | X | --- | |

Tabla 16. Resumen del cumplimiento de la normatividad oficial mexicana para el año 2011

| Cumplimiento de la norma | | Rendimiento | |
|--------------------------|--------------------------|-------------|-----------------------------|
| ✓ | Si | | Bueno >75% de datos |
| X | No | | Regular (50% > datos < 75%) |
| ? | No hay datos suficientes | | Malo (datos < 50%) |
| --- | Sin datos | | Sin datos |

Tabla 17. Descripción de la simbología utilizada en la tabla 1.

9.2 Comportamiento temporal de los contaminantes criterio

Ciclo Diurno

- El ozono muestra un máximo alrededor del mediodía. Mientras que las concentraciones más bajas de este contaminante se registraron durante las primeras horas de la mañana. Todas las estaciones de monitoreo siguieron este patrón a pesar de la variabilidad en la cantidad de datos que cada una registró.
- El dióxido de nitrógeno y monóxido de carbono muestran un comportamiento bimodal en esta escala de tiempo. El primero pico de alta concentración se registra durante las primeras horas de la mañana en ambos contaminantes. Mientras que, el segundo pico se observa durante las primeras horas de la noche. Las horas de alta concentración están relacionadas con el horario de mayor tránsito vehicular dentro de la ciudad.
- El material particulado y el dióxido de azufre no tienen un patrón claro para esta escala de tiempo. En el caso del material particulado, esto puede asociarse a la poca cantidad de datos con los que cuentan las estaciones. Mientras que para el dióxido de azufre, al ser emitido por fuentes puntuales (industria) los registros de las estaciones son influenciados por otros factores ambientales como el viento.

Ciclos semanales

- Para ningún contaminante y en ninguna estación, se observó un patrón definido. Aunque aparentemente los valores eran más altos o más bajos para algunos días de la semana, las diferencias entre éstos no fueron significativas.

Comportamiento mensual

- En todas las estaciones las concentraciones más altas de ozono se registraron entre abril y agosto. De agosto a diciembre hubo una disminución en el valor de las concentraciones, mientras que de enero a abril el valor de las mismas aumenta progresivamente.
- Las concentraciones más altas de dióxido de azufre se registraron durante los últimos meses del año (octubre-diciembre), en todas las estaciones. La estación con mayor cantidad de datos para este contaminante fue Bomberos.
- En cuanto al comportamiento del monóxido de carbono, se observa un aumento en el valor de las concentraciones promedio durante la segunda mitad del año para la mayoría de las estaciones. La excepción es la estación Corregidora, en donde no es posible determinar si sigue el mismo comportamiento debido a la falta de datos. Esto se puede asociar con una mayor estabilidad atmosférica durante los meses de invierno.
- Todas las estaciones muestran un comportamiento diferente en el valor de las concentraciones promedio de los óxidos de nitrógeno. En las estaciones Bomberos, Félix Osores y Del. Epigmenio, se observa un aumento en el valor promedio mensual a partir de agosto. Sin embargo, no es posible saber si el aumento es progresivo hasta finalizar el año, ya que únicamente Félix Osores cuenta con datos para el mes de diciembre.
- Para el material particulado, debido a la falta de datos y a la confiabilidad de los mismos, no se puede establecer una tendencia anual.

9.3 Relación entre concentración de contaminantes criterio y variables meteorológicas

- El ozono y la radiación solar tienen una correlación positiva. Los meses en los que se registró la mayor cantidad de radiación solar, son también los meses en los que la concentración de ozono es más alta en todas las estaciones. Por otro lado, en ambas variables se observa un pico de máxima concentración durante el ciclo diurno, solo que las horas en las que se presentan difieren por una o dos horas.
- Contrario a lo esperado, la precipitación y la humedad no afectan a la concentración de dióxido de azufre y material particulado. En algunas estaciones se observa un incluso una correlación positiva entre ambas variables.
- De igual manera, no se encontró una correlación entre la dirección y velocidad del viento y la concentración de los contaminantes criterio.

Lo anterior puede asociarse a dos cosas: la primera es la diversidad de contaminantes analizados. Cada uno con características químicas diferentes, por lo que cada uno interacciona de diferente forma con otros componentes de la atmósfera o factores ambientales. El segundo factor puede ser la falta de datos de calidad del aire. El hecho de tener pocos datos, limita el análisis a mayor escala.

10. Recomendaciones

a) Mejoramiento de la red automática de monitoreo atmosférico de la ciudad de Querétaro

- Brindar mantenimiento adecuado y continuo a los equipos de monitoreo. De esta manera se garantiza la calidad de los datos y permite establecer de manera adecuada el cumplimiento de la normatividad oficial.
- Colocar más estaciones de monitoreo de calidad del aire o reubicar las ya existentes. Si bien las estaciones con las que cuenta la ciudad cubren la mancha urbana, algunas no registran valores representativos de un área grande. Tal es el caso de la estación Bomberos, que se localiza muy cerca de una de las avenidas más transitadas de la ciudad; por lo que las concentraciones que registra son influenciadas por las emisiones vehiculares y no necesariamente representan el estado de la atmósfera cercana.
Tomando en cuenta los patrones de dirección del viento, considero adecuado colocar una estación de monitoreo entre las estaciones Félix Osores y Corregidora. Además de considerar la estación que se encuentra dentro de la UNAM campus Juriquilla, la cual toma datos del norte de la mancha urbana.
- Implementar programas de control de emisión de contaminantes a la atmósfera. Ya que, si bien aún no se registran eventos de alta contaminación, con el crecimiento de la ciudad, más contaminantes serán emitidos a la atmósfera.

b) Difusión y divulgación de los índices de calidad del aire

- Actualmente la SEDESU cuenta con una página de internet (<http://www.queretaro.gob.mx/sedesu/contenido.aspx?q=0P7NpleTMwym41WDuQvFdpn5eF3E9IBUZc/dMddjKxE>) donde se publica la calidad del aire semanalmente. Desafortunadamente la información no se actualiza constantemente y pocas personas tienen conocimiento de ésta. Por lo que, se recomienda realizar un análisis continuo de los datos (diario) y divulgar los resultados obtenidos en medios más accesibles como redes sociales. De esta manera la población tendrá conocimiento sobre la calidad del aire y de ser necesario tomará medidas de precaución.
- Realizar informes anuales sobre la calidad del aire de la ciudad, que estén dirigidos a la sociedad en general.

c) Investigación

- Realizar estudios en conjunto con el sector salud para determinar si hay relaciones la concentración de contaminantes criterio y la incidencia de enfermedades respiratorias y cardiovasculares.
- Realizar anualmente estudios como el descrito en el trabajo de tesis. Lo cual permitirá llevar un registro histórico de la evolución de la calidad del aire y encontrar una relación con variables antrópicas como el crecimiento de la ciudad o la densidad vehicular.

Anexos

Sección A: Normatividad internacional

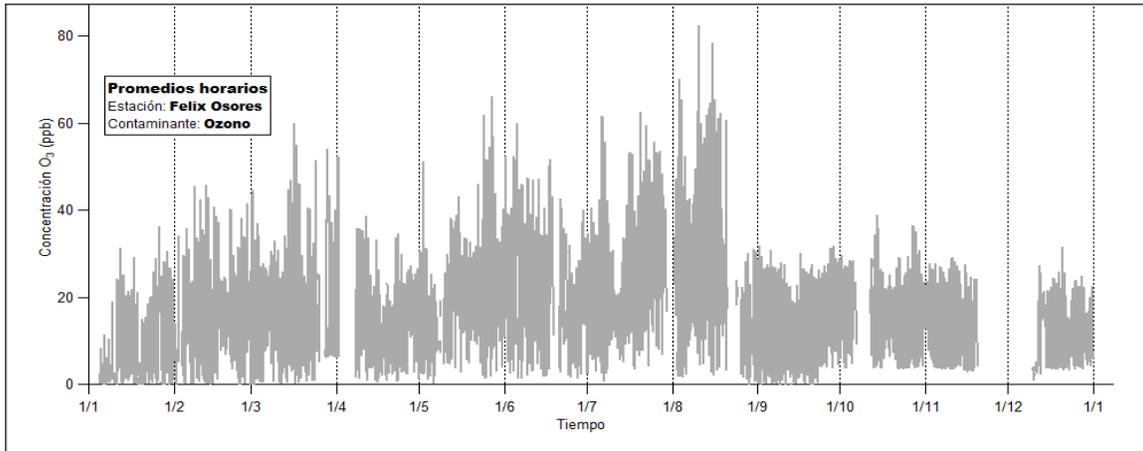
Tabla 18. Muestra los límites máximos de concentración de los contaminantes criterio establecidos por la EPA (Environmental Protection Agency).

| Contaminante | Especificaciones |
|------------------------------------|---|
| Ozono | 75 ppb Promedio trianual del 4 ^{to} máximo. |
| Dióxido de azufre | 75 ppb Promedio trianual percentil 99. |
| Dióxido de nitrógeno | 110 ppb Promedio trianual del percentil 99. 53 ppb Promedio anual. |
| Monóxido de carbono | 35 ppm Máximo de una hora. 9 ppm Máximo de ocho horas. |
| Partículas menores a 10 µm | 150 µg/m³ Promedio de trianual del 2° máximo de 24 horas. |
| Partículas menores a 2.5 µm | 35 µg/m³ Promedio trianual del 2° máximo de 24 horas 12 µg/m³ Promedio trianual. |

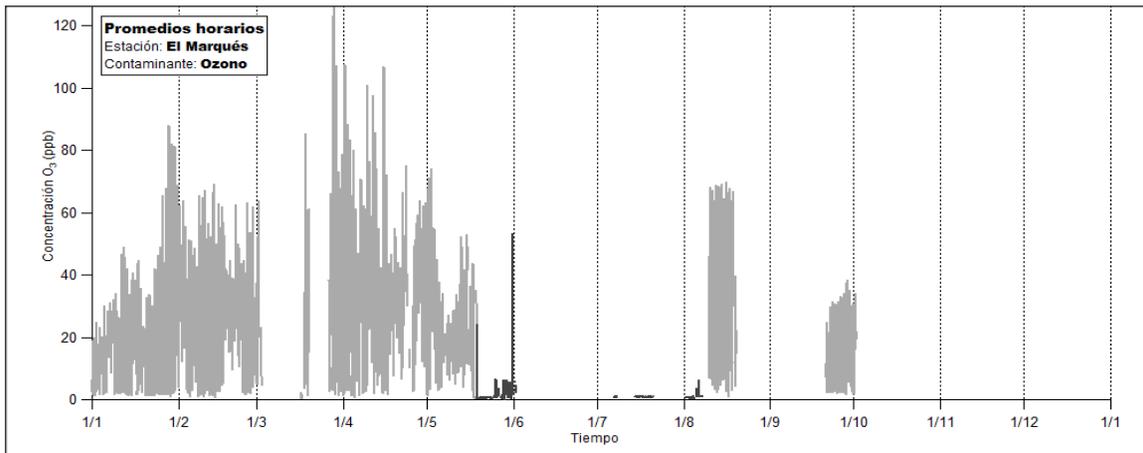
Tabla 19. Muestra los límites máximos de concentración de los contaminantes criterio establecidos por la OMS (Organización Mundial de la Salud).

| Contaminante | Especificaciones |
|------------------------------------|--|
| Ozono | 110 µg/m³ Máximo de 8 horas. |
| Dióxido de azufre | 20 µg/m³ Máximo 24 horas |
| Dióxido de nitrógeno | 200 µg/m³ Máximo una hora 40 µg/m³ Promedio anual. |
| Monóxido de carbono | 30,000µg/m³ Máximo de una hora. 10,000µg/m³ Máximo de ocho horas. |
| Partículas menores a 10 µm | 50 µg/m³ Percentil 99 en 24 horas. 20 µg/m³ Promedio Anual. |
| Partículas menores a 2.5 µm | 25 µg/m³ Percentil 99 en 24 horas 10 µg/m³ Promedio anual. |

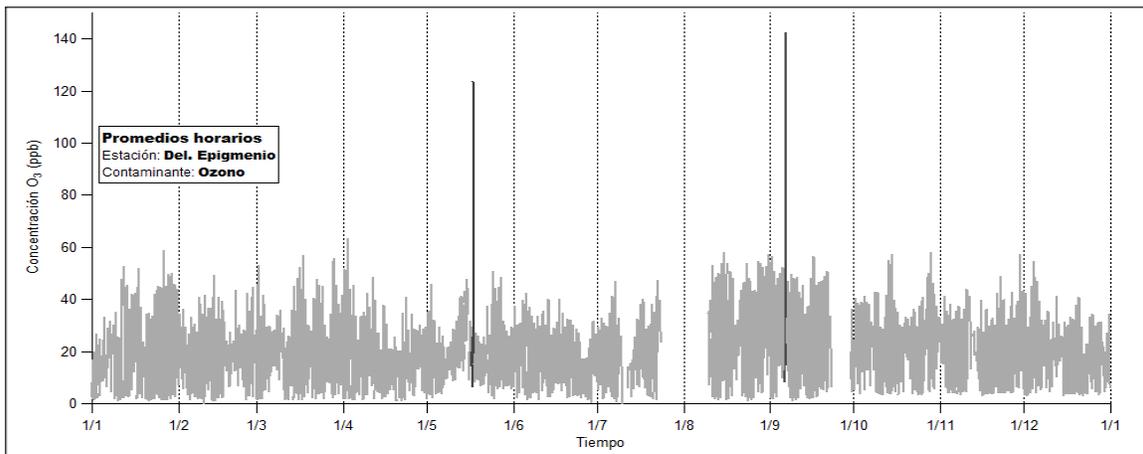
Sección B: Promedio horarios



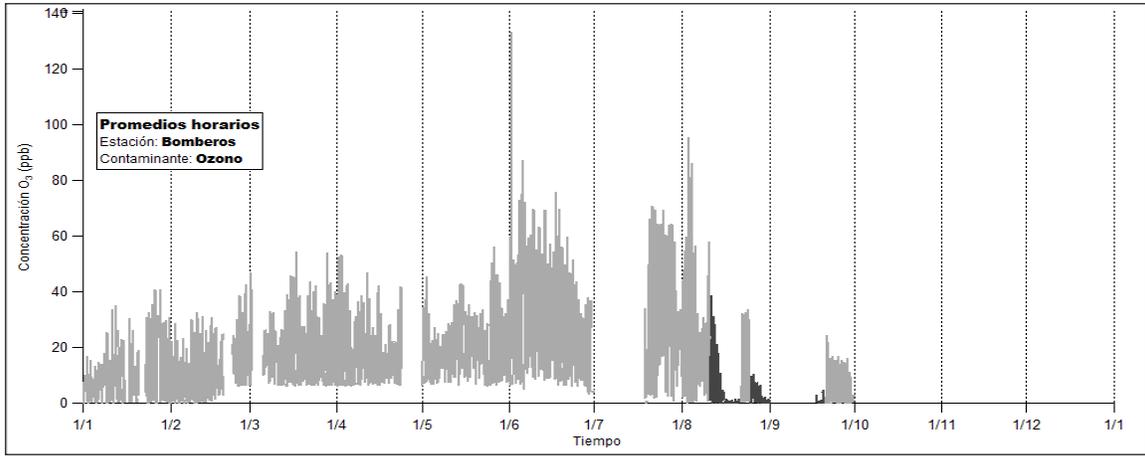
Anexo B 1. Muestra las concentraciones horarias de O₃ obtenidas durante el 2013 por la estación Félix Osores.



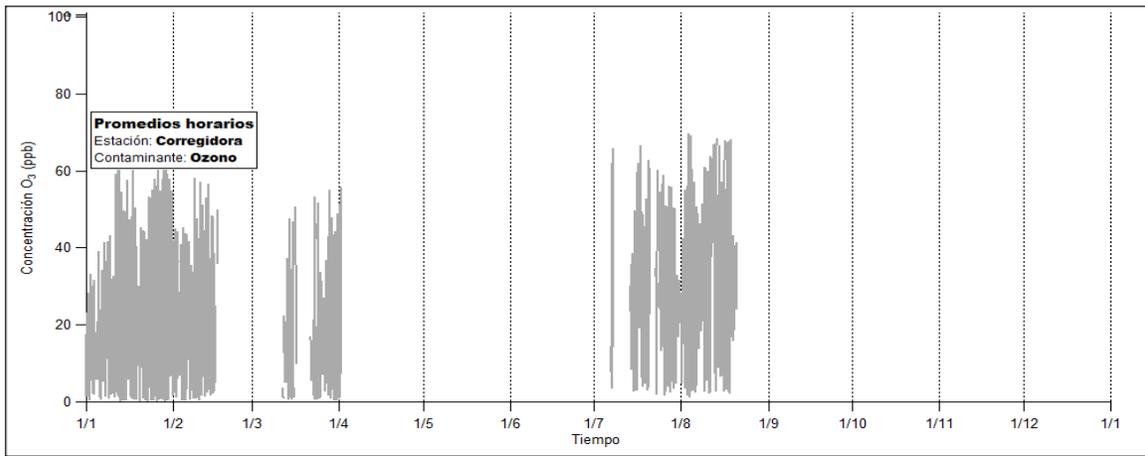
Anexo B 2. Muestra las concentraciones horarias de O₃ obtenidas durante el 2013 por la estación El Marqués.



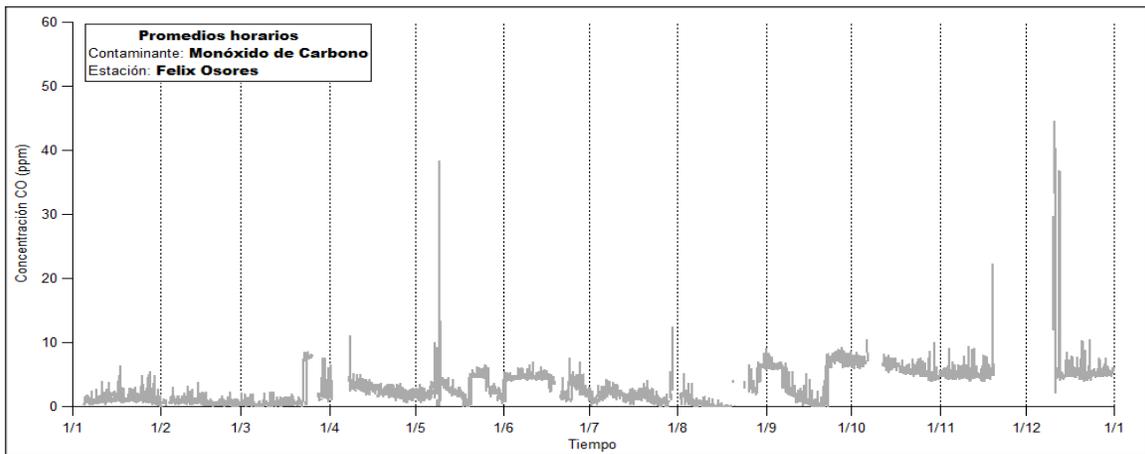
Anexo B 3. Muestra las concentraciones horarias de O₃ obtenidas durante el 2013 por la estación Del. Epigmenio.



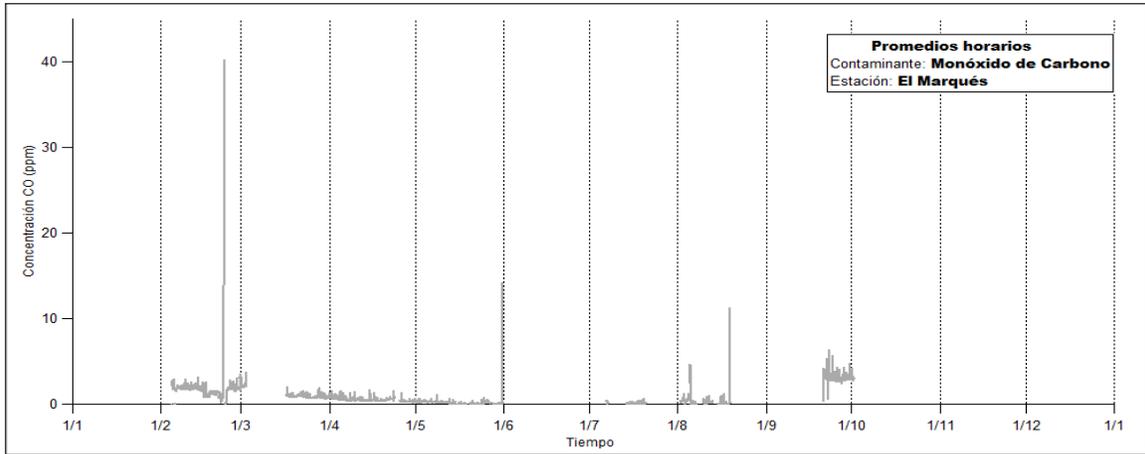
Anexo B 4. Muestra las concentraciones horarias de O_3 obtenidas durante el 2013 por la estación Bomberos.



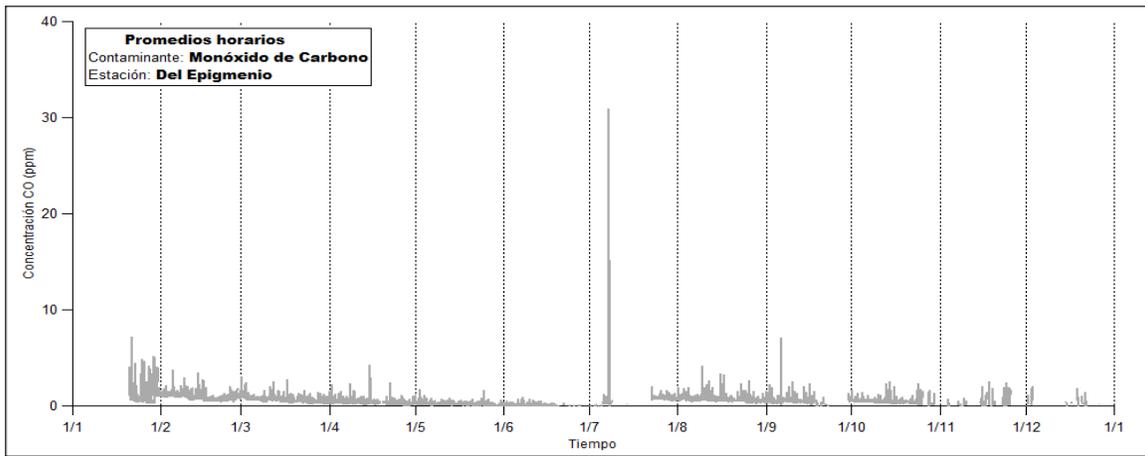
Anexo B 5. Muestra las concentraciones horarias de ozono obtenidas durante el 2013 por la estación Corregidora.



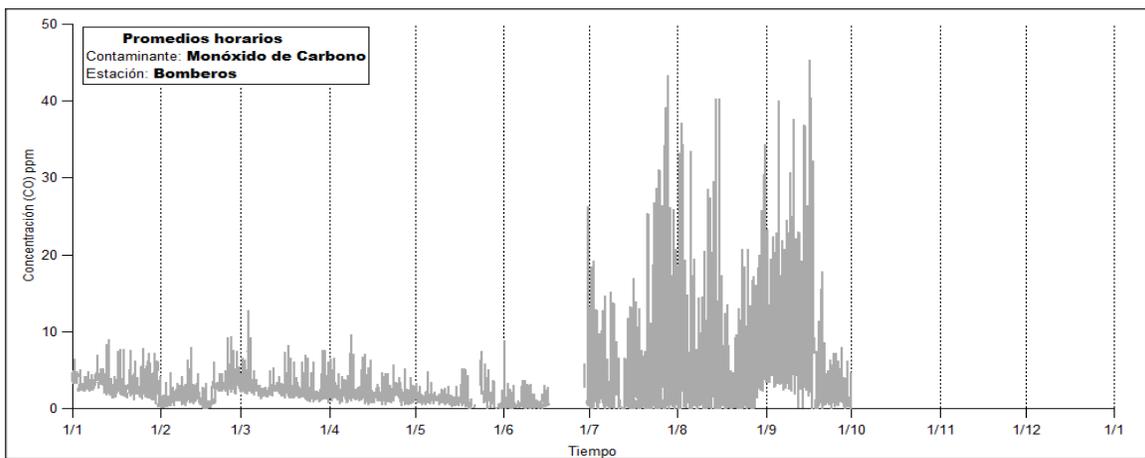
Anexo B 6. Muestra las concentraciones horarias de CO obtenidas durante el 2013 por la estación Félix Osores.



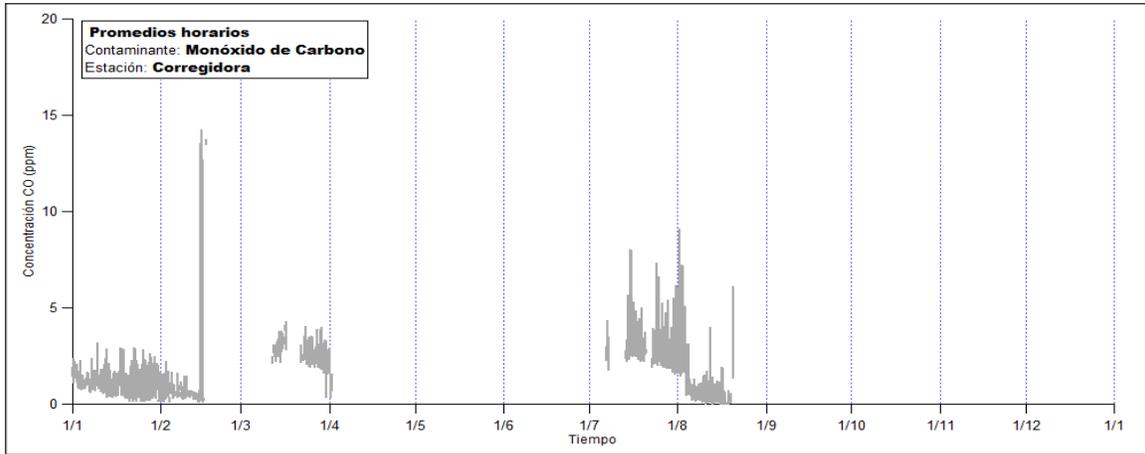
Anexo B 7. Muestra las concentraciones horarias de CO obtenidas durante el 2013 por la estación Félix Osoros.



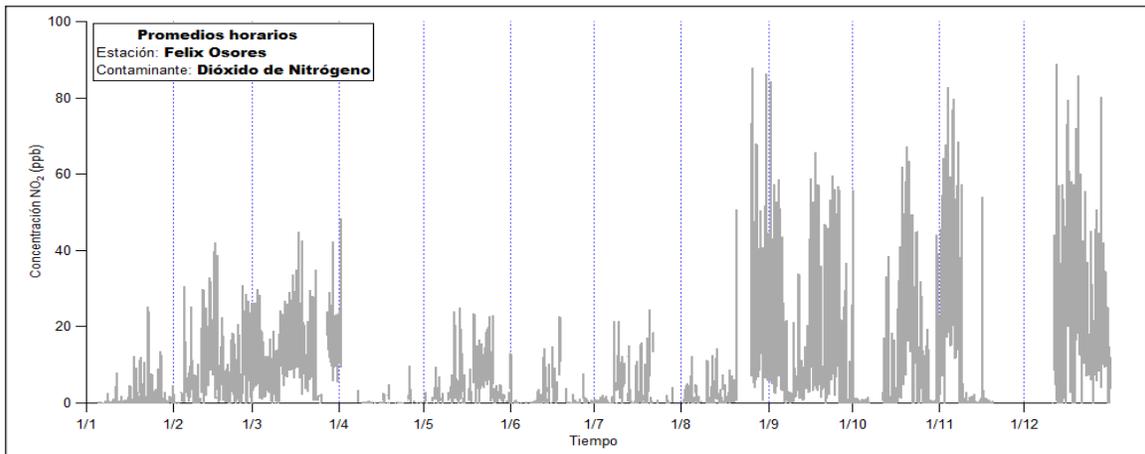
Anexo B 8. Muestra las concentraciones horarias de CO obtenidas durante el 2013 por la estación Del. Epigmenio.



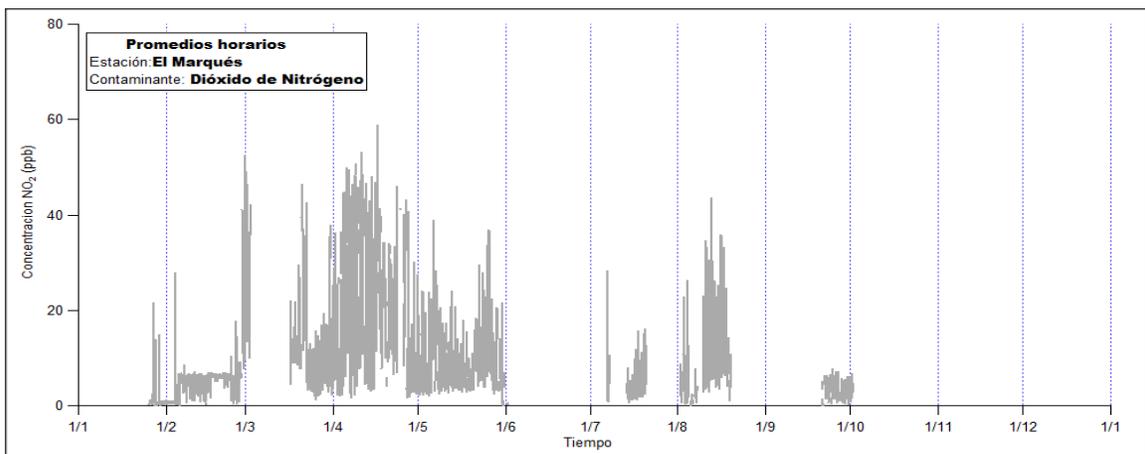
Anexo B 9. Muestra las concentraciones horarias de CO obtenidos durante el 2013 por la estación Bomberos.



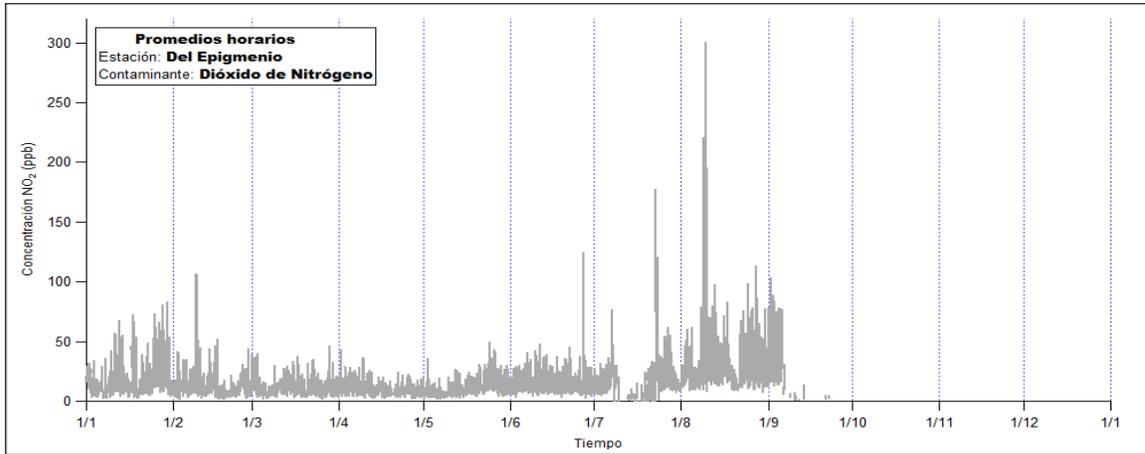
Anexo B 10. Muestra las concentraciones horarias de CO obtenidos durante el 2013 por la estación Corregidora.



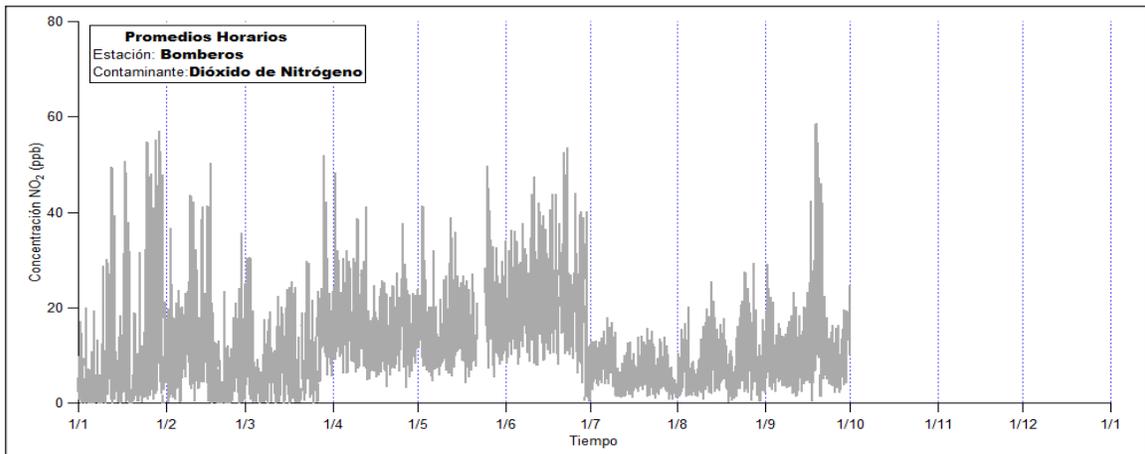
Anexo B 11. Muestra las concentraciones horarias de NO₂ obtenidos durante el 2013 por la estación Félix Osores.



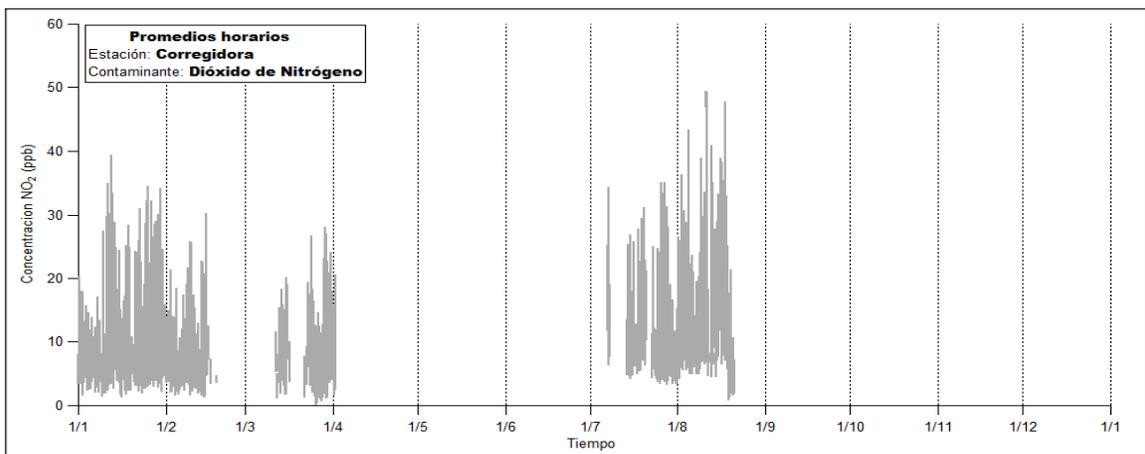
Anexo B 12. Muestra las concentraciones horarias de NO₂ obtenidas durante el 2013 por la estación El Marqués.



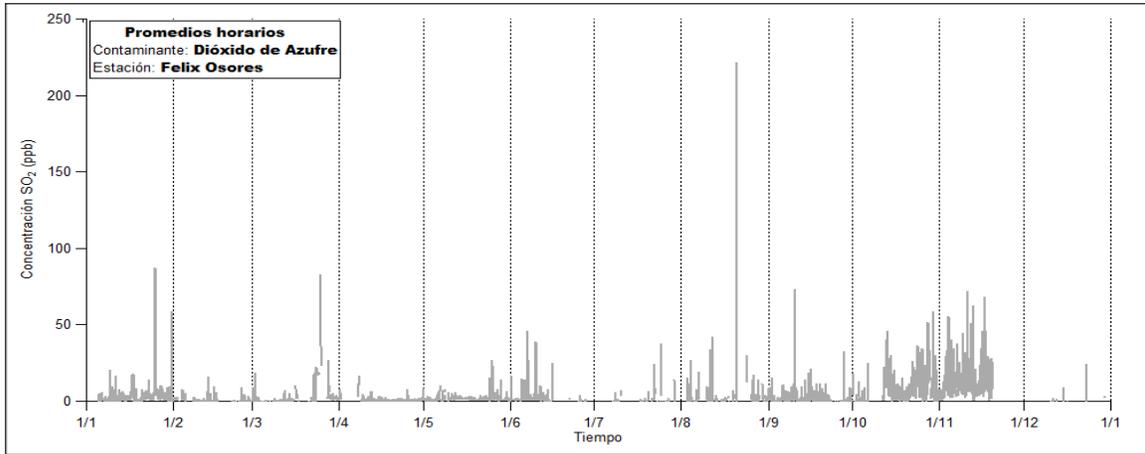
Anexo B 13. Muestra las concentraciones horarias de NO_2 obtenidas durante el 2013 por la estación Del. Epigmenio.



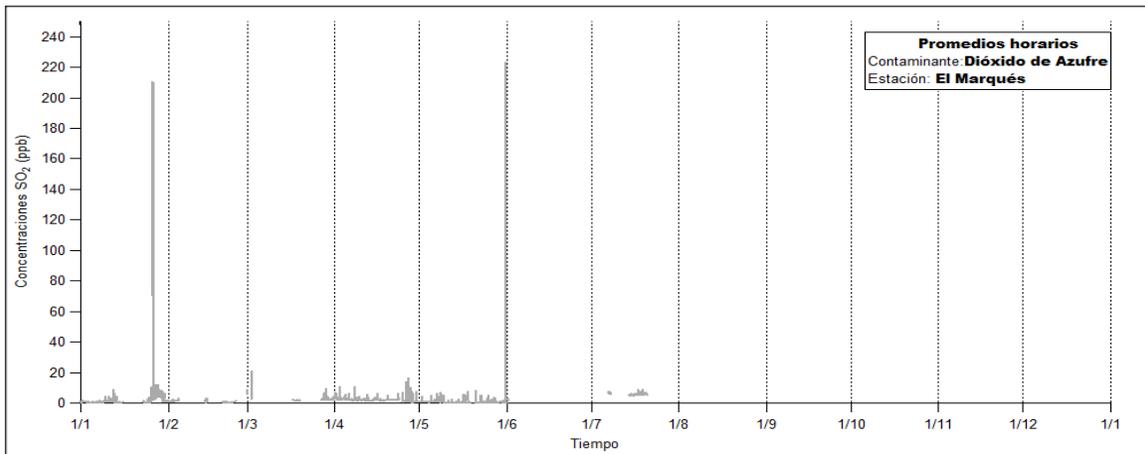
Anexo B 14. Muestra las concentraciones horarias de NO_2 obtenidas durante el 2013 por la estación Bomberos.



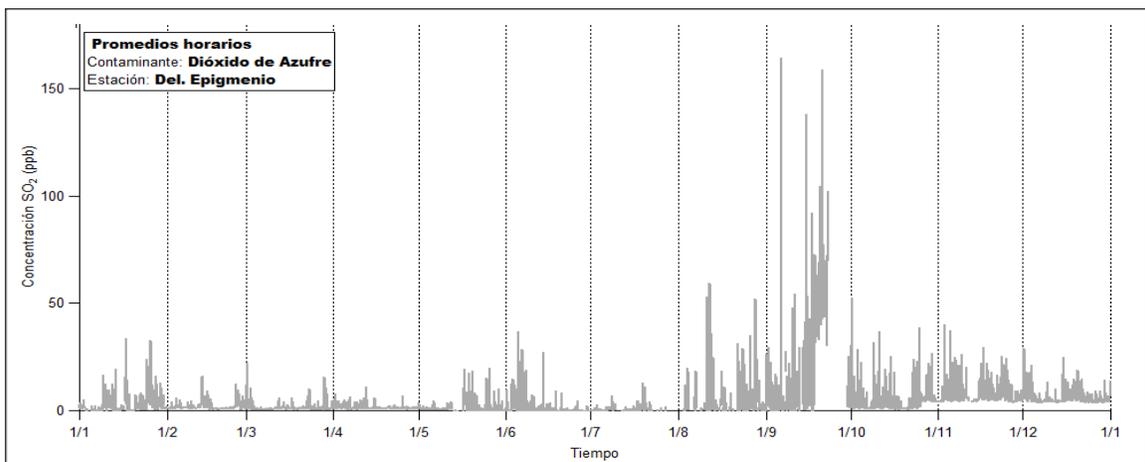
Anexo B 15. Muestra las concentraciones horarias de NO_2 obtenidas durante el 2013 por la estación Corregidora.



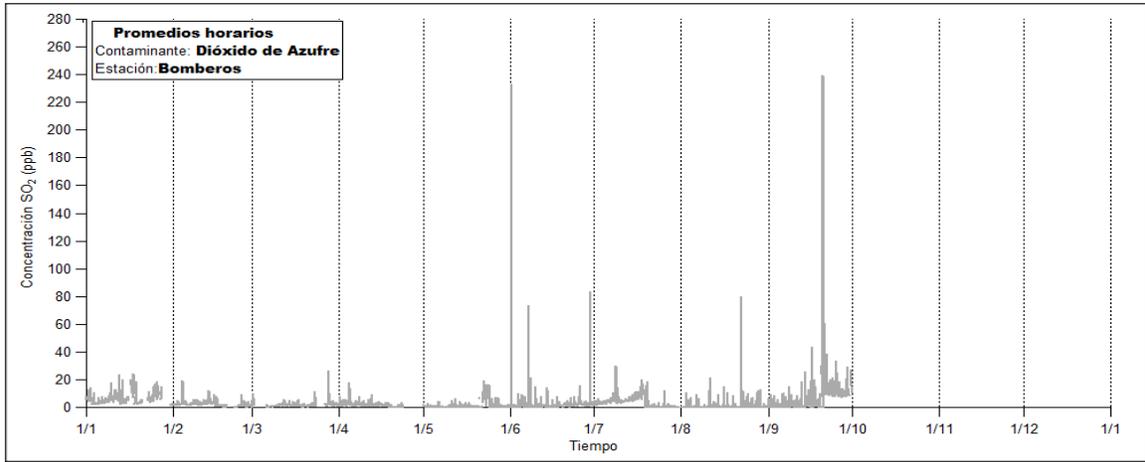
Anexo B 16. Muestra las concentraciones horarias de SO_2 obtenidas durante el 2013 por la estación Félix Osos.



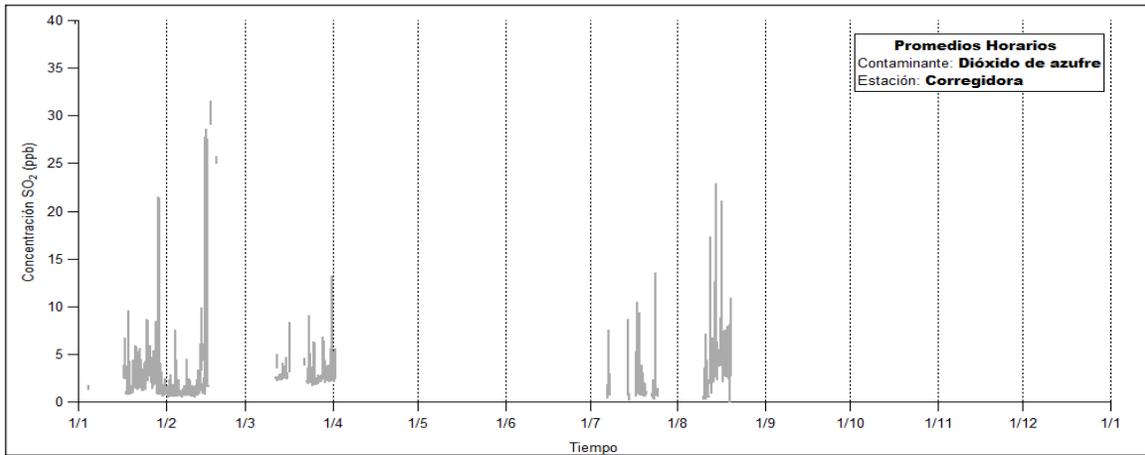
Anexo B 17. Muestra las concentraciones de SO_2 obtenidas durante el 2013 por la estación El Marqués.



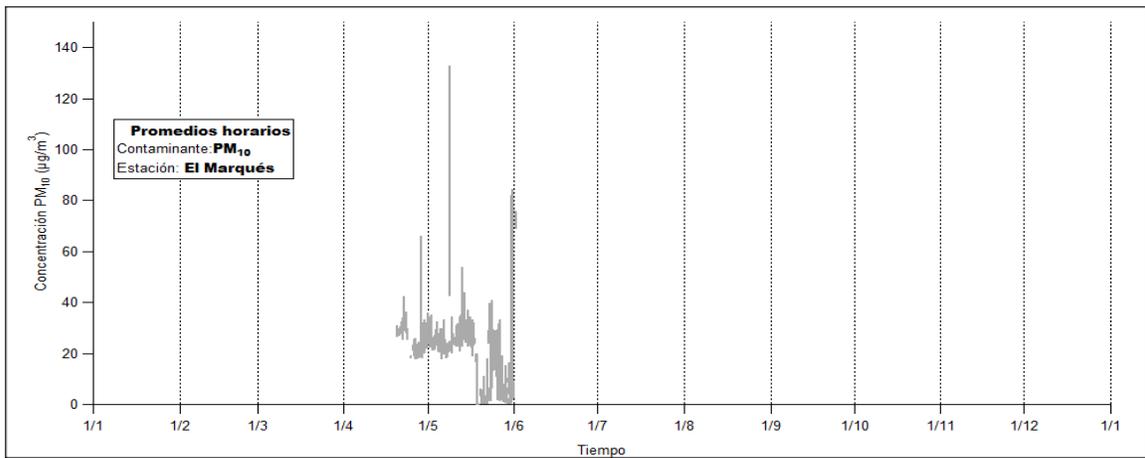
Anexo B 18. Muestra las concentraciones horarias de SO_2 obtenidas durante el 2013 por la estación Del. Epigmenio.



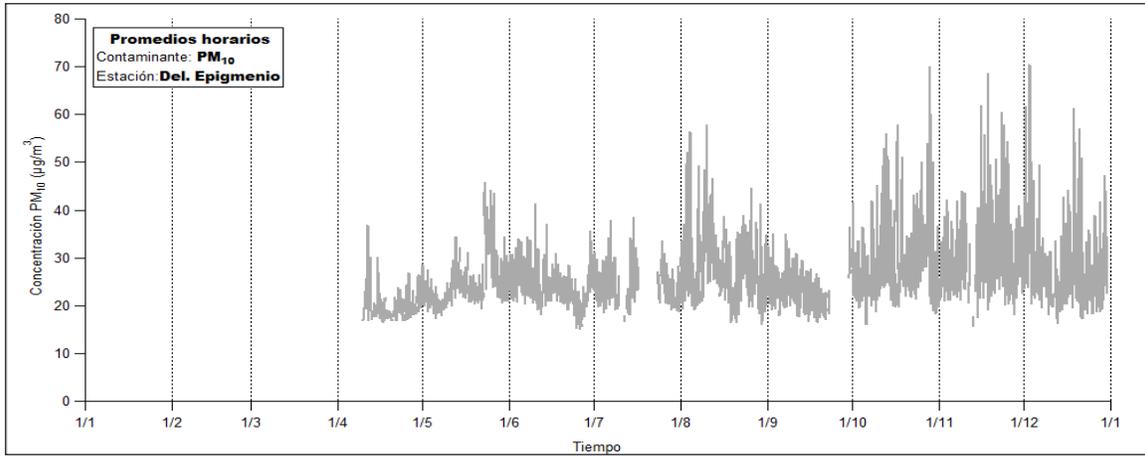
Anexo B 19. Muestra las concentraciones horarias de SO_2 obtenidas durante el 2013 por la estación Bomberos.



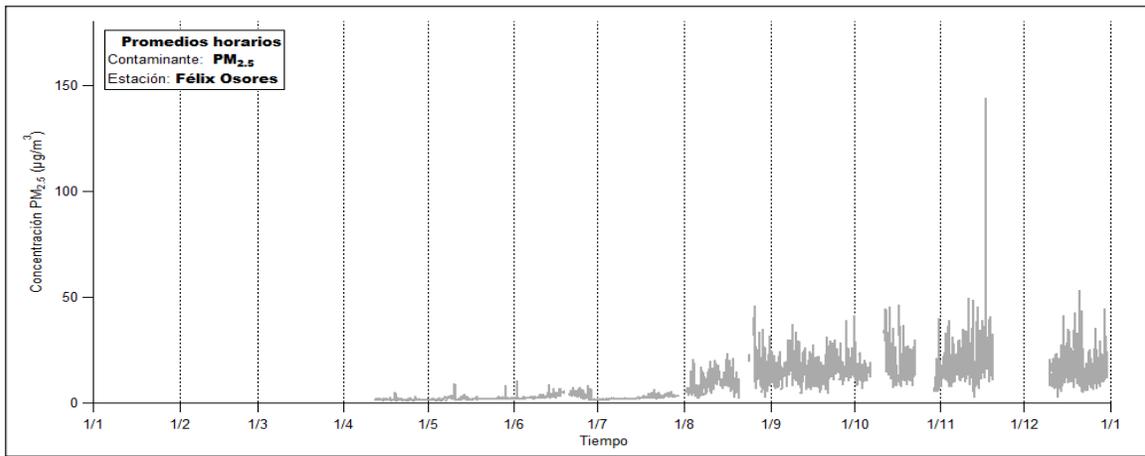
Anexo B 20. Muestra las concentraciones horarias de SO_2 obtenidas durante el 2013 por la estación Corregidora.



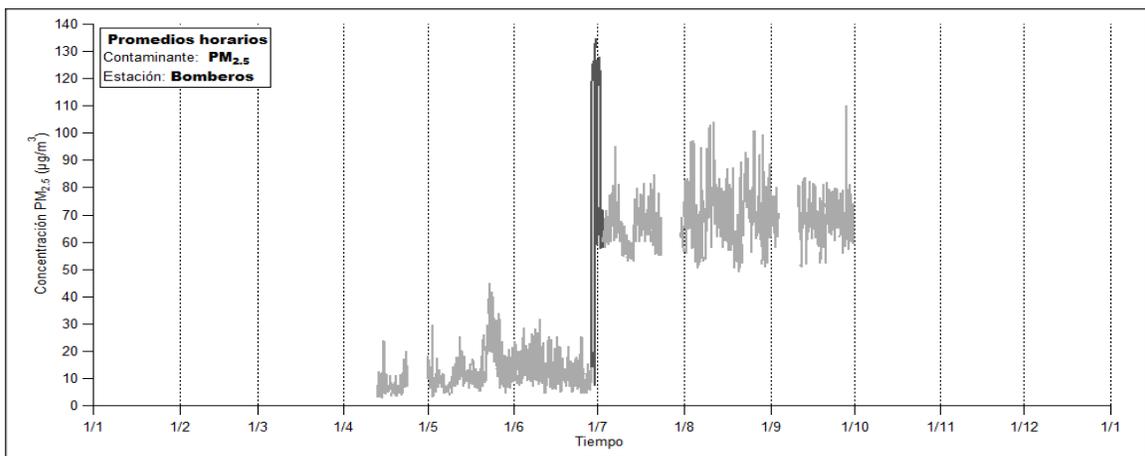
Anexo B 21. Muestra las concentraciones horarias de PM_{10} obtenidas durante el 2013 por la estación El Marques.



Anexo B 22. Muestra las concentraciones horarias de PM₁₀ obtenidas durante el 2013 por la estación Del. Epigmenio.

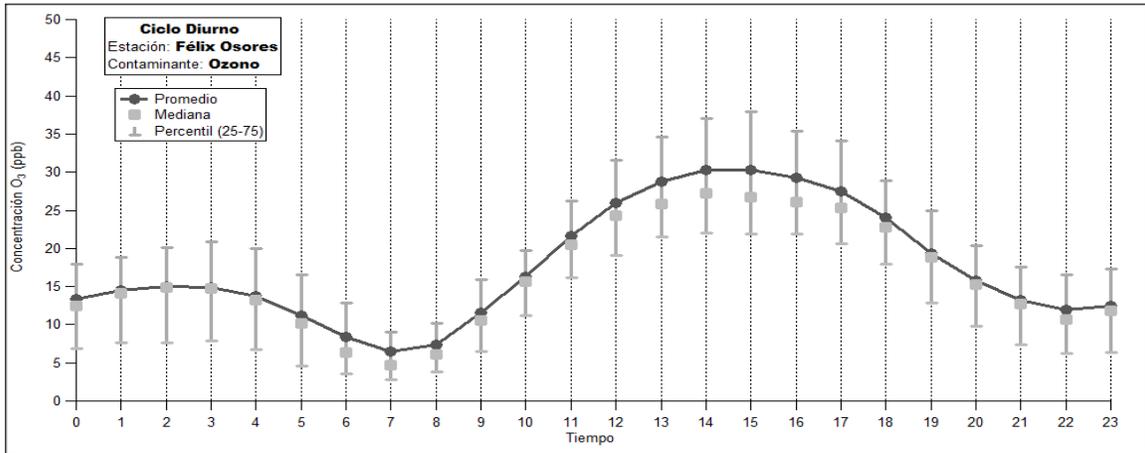


Anexo B 23. Muestra las concentraciones horarias de PM_{2.5} obtenidas durante el 2013 por la estación Félix Osoreos.

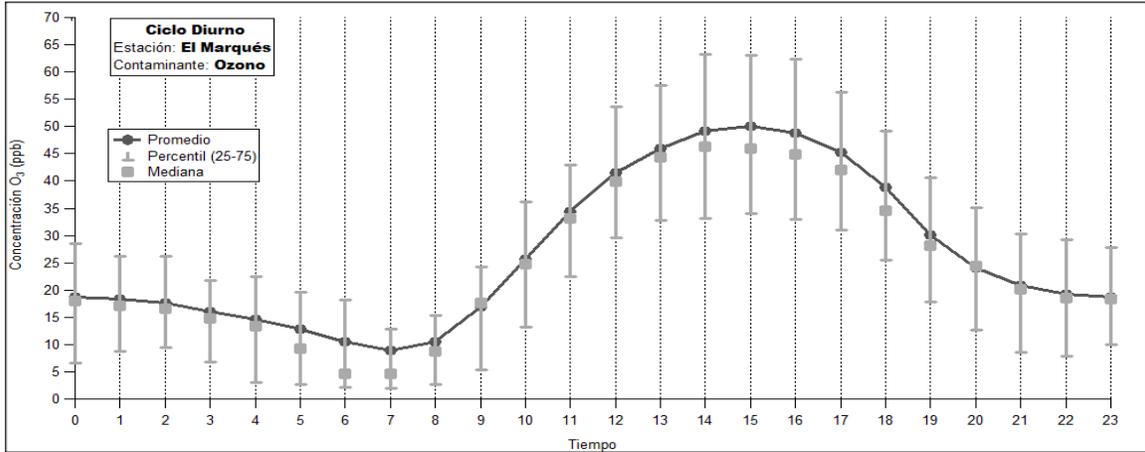


Anexo B 24. Muestra las concentraciones horarias de PM_{2.5} obtenidas durante el 2013 por la estación Bomberos.

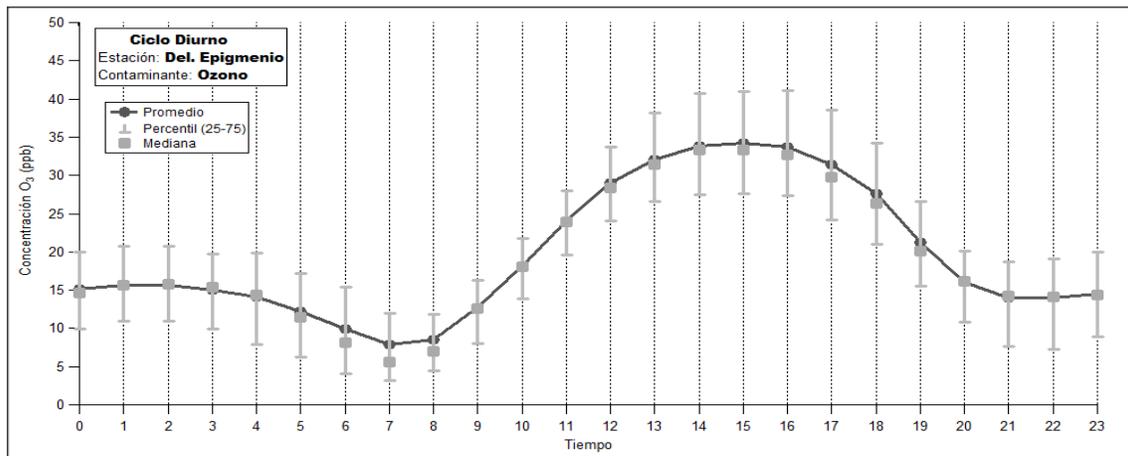
Sección C: Ciclos Diurnos



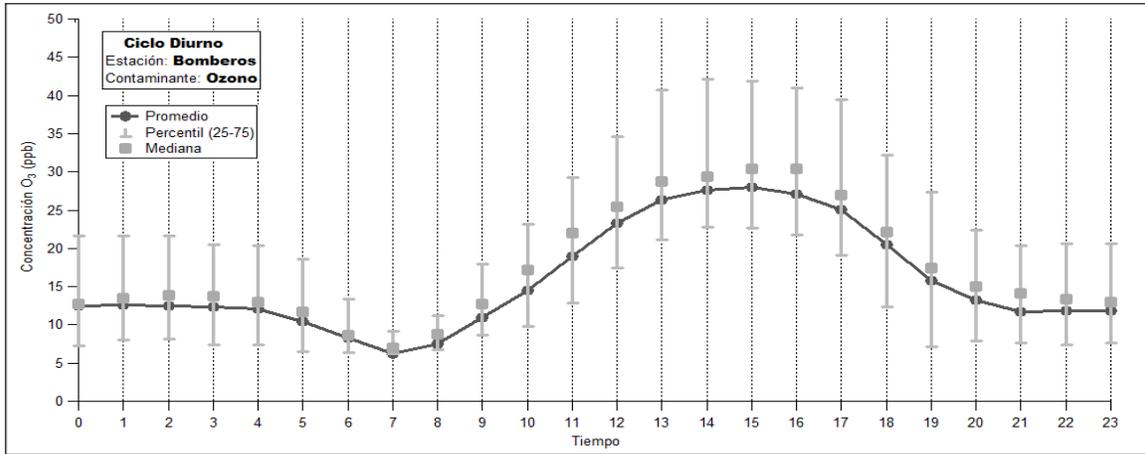
Anexo C 1. Muestra el ciclo diario del O₃ obtenido durante el 2013 por la estación Félix Osores.



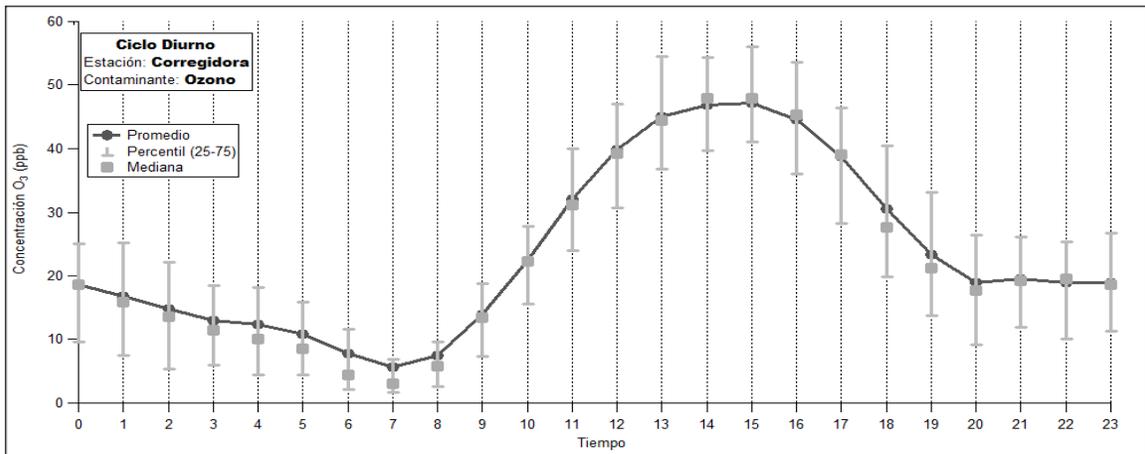
Anexo C 2. Muestra el ciclo diario del O₃ obtenido durante el 2013 por la estación El Marqués.



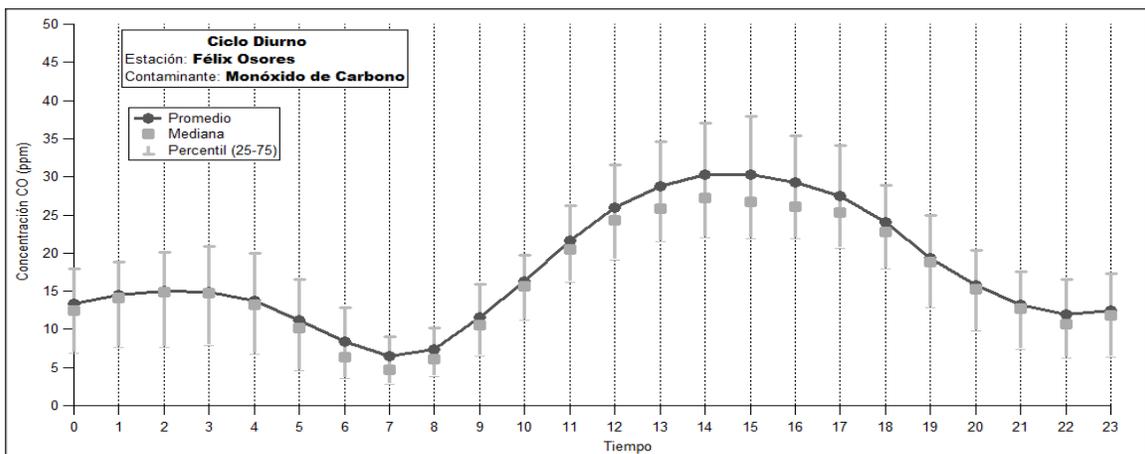
Anexo C 3. Muestra el ciclo diario del O₃ obtenido durante el 2013 por la estación Del. Epigenio.



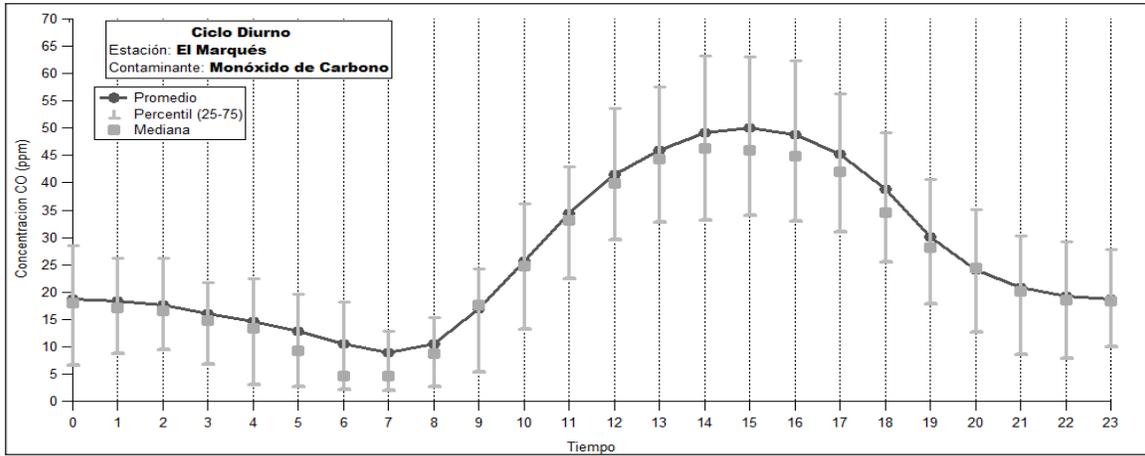
Anexo C 4. Muestra el ciclo diario del O_3 obtenido durante el 2013 por la estación Bomberos.



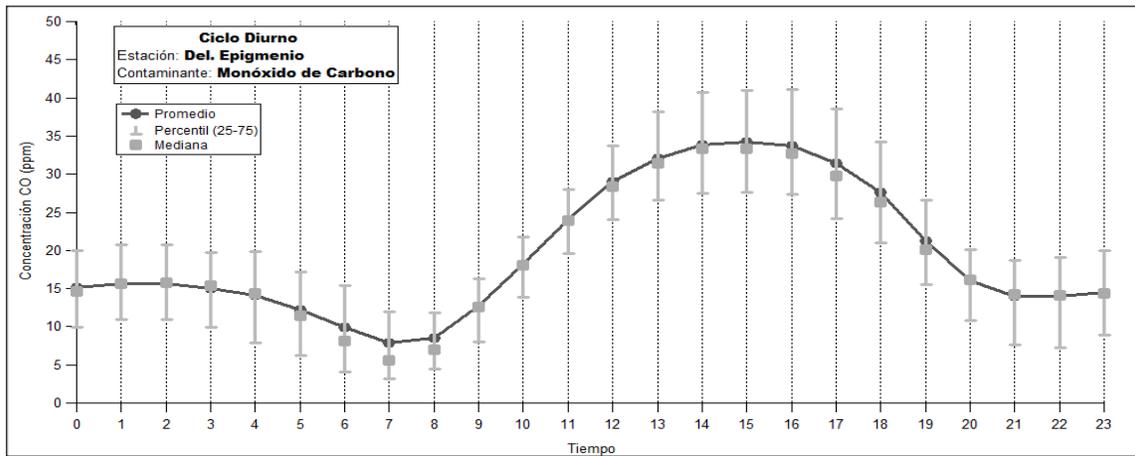
Anexo C 5. Muestra el ciclo diario del O_3 obtenido durante el 2013 por la estación Corregidora.



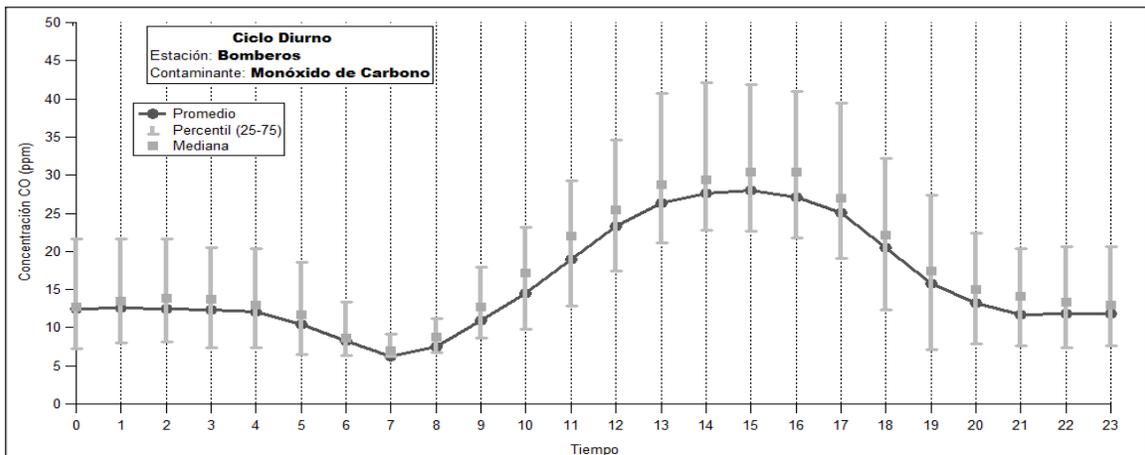
Anexo C 6. Muestra el ciclo diario del CO obtenido durante el 2013 por la estación Félix Osores.



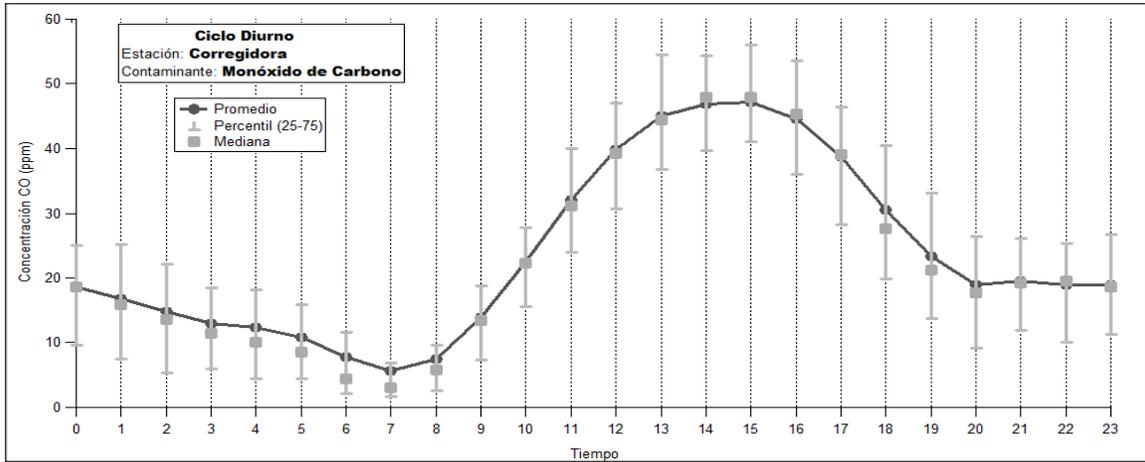
Anexo C 7. Muestra el ciclo diurno del CO obtenido durante el 2013 por la estación El Marqués.



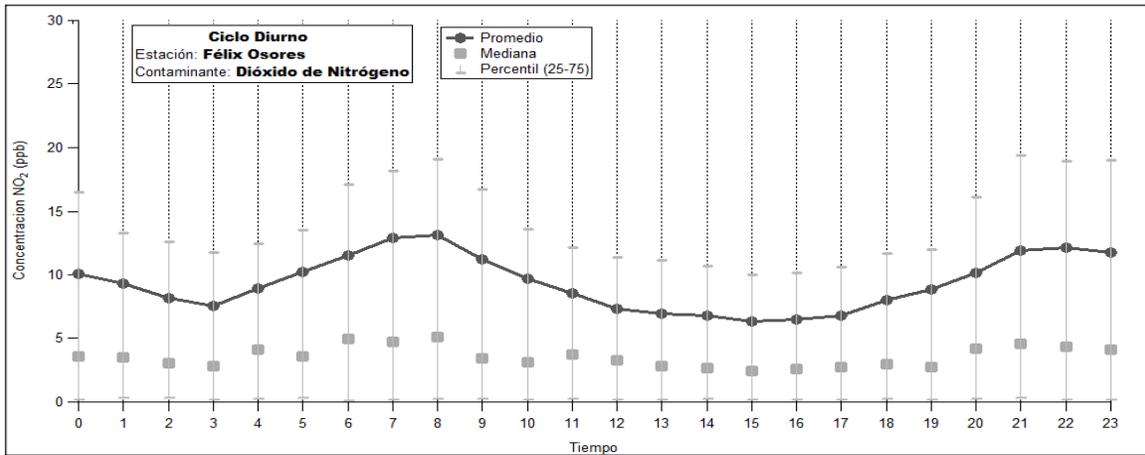
Anexo C 8. Muestra el ciclo diurno del CO obtenido durante el 2013 por la estación Del. Epigenio.



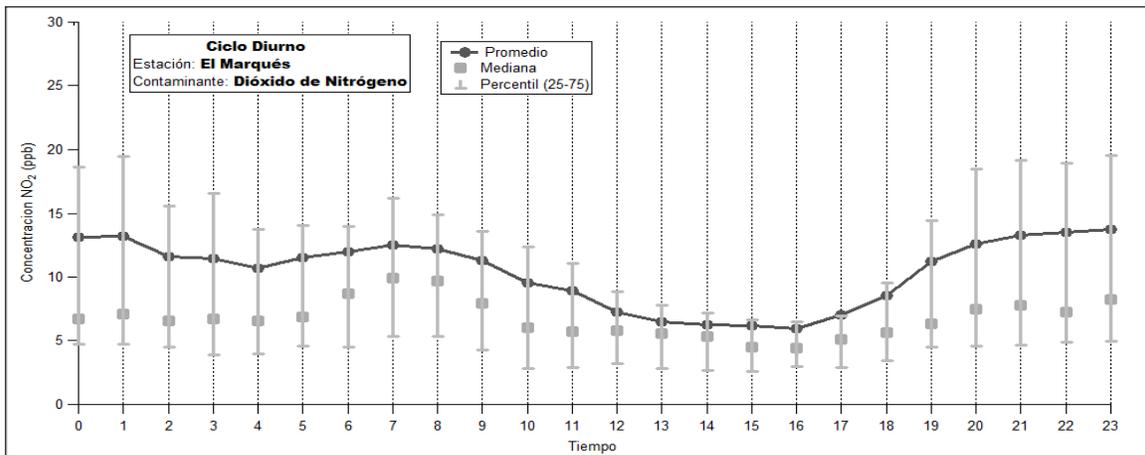
Anexo C 9. Muestra el ciclo diurno del CO obtenido durante el 2013 por la estación Bomberos.



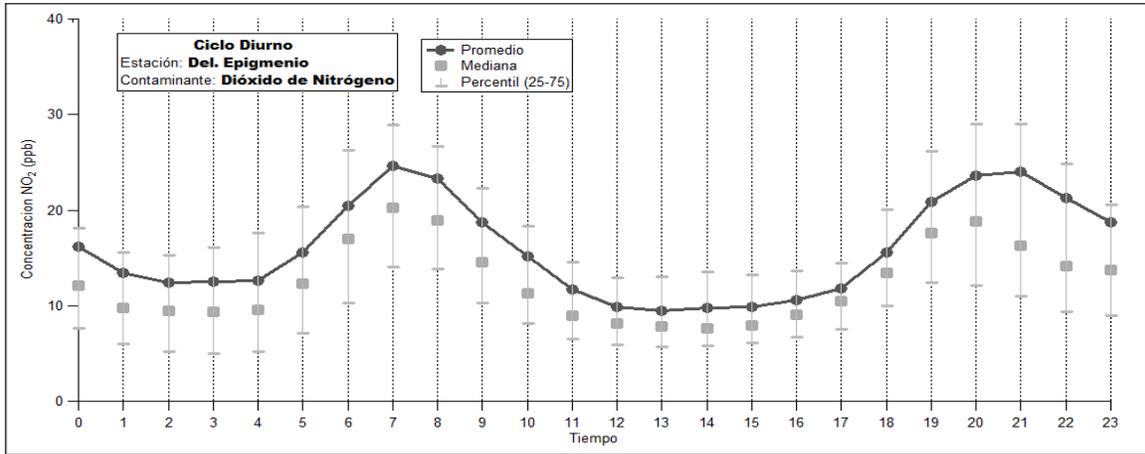
Anexo C 10. Muestra el ciclo diurno del CO obtenido durante el 2013 por la estación Corregidora.



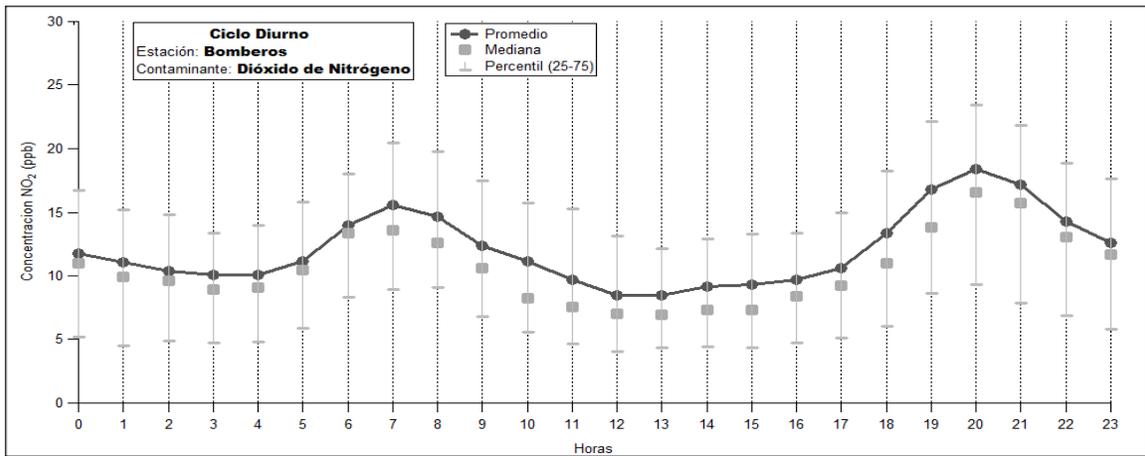
Anexo C 11. Muestra el ciclo diurno del NO₂ obtenido durante el 2013 por la estación Félix Osores.



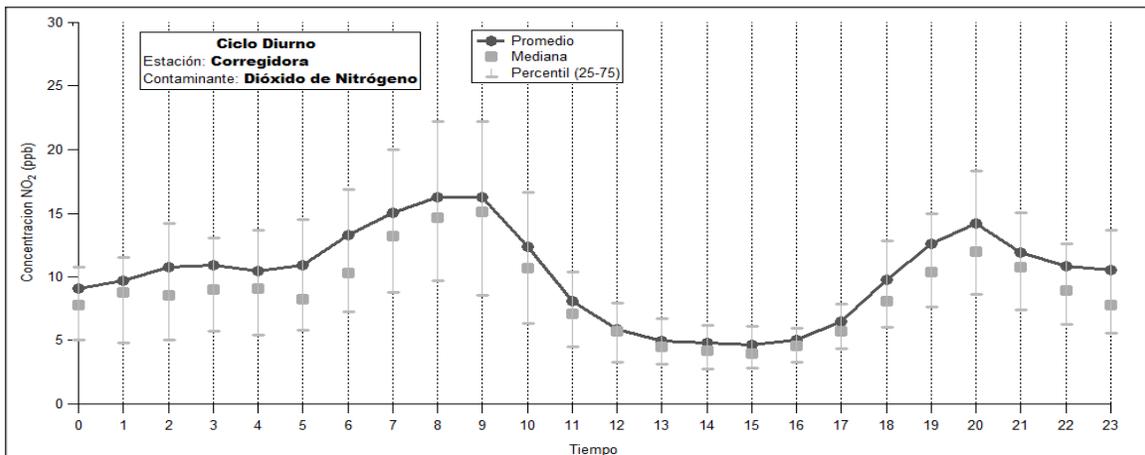
Anexo C 12. Muestra el ciclo diurno del NO₂ obtenido durante el 2013 por la estación El Marqués.



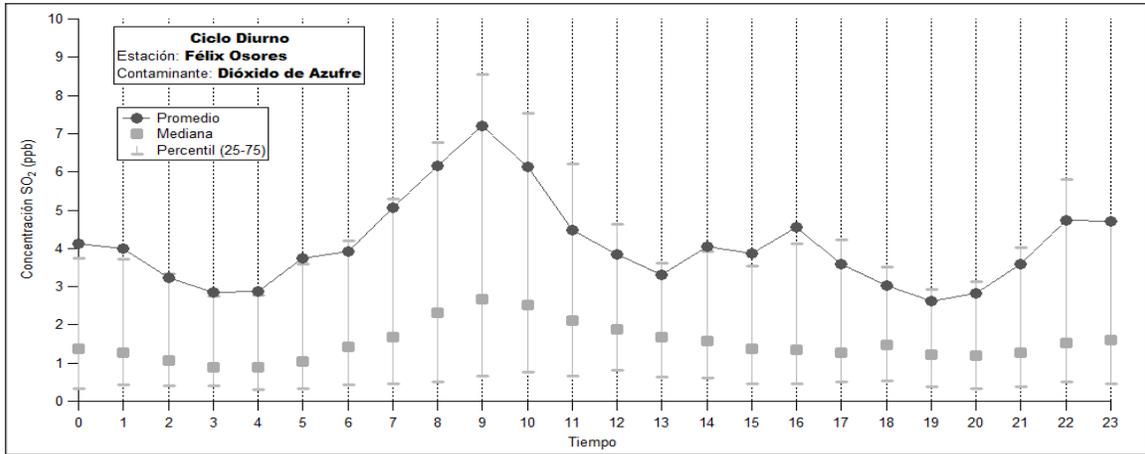
Anexo C 13. Muestra el ciclo diurno del NO₂ obtenido durante el 2013 por la estación Del. Epigmenio.



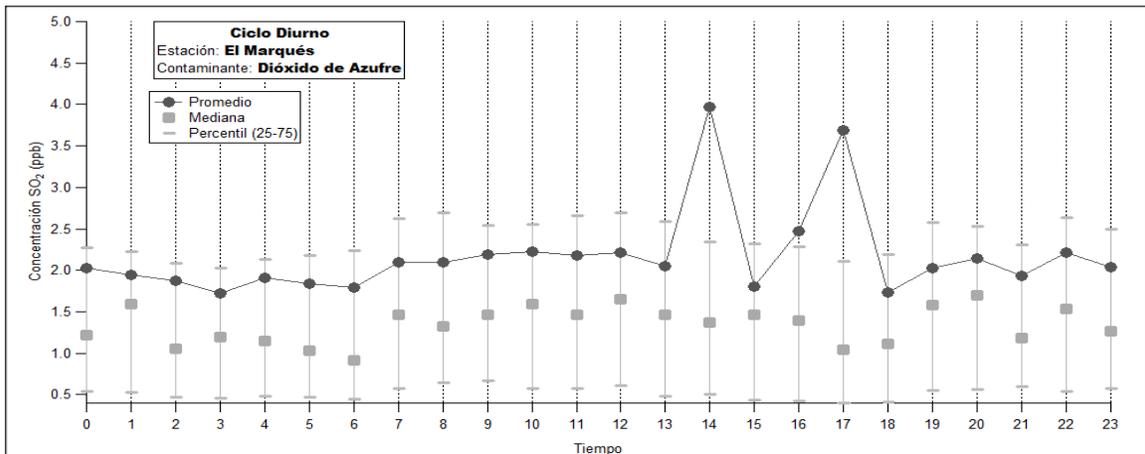
Anexo C 14 .Muestra el ciclo diurno del NO₂ obtenido durante el 2013 por la estación Bomberos.



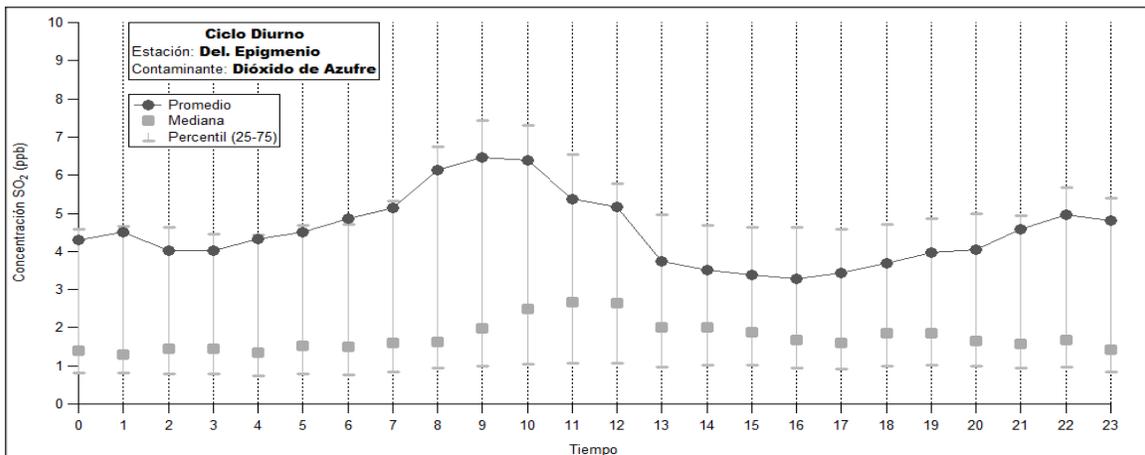
Anexo C 15. Muestra el ciclo diurno del NO₂ obtenido durante el 2013 por la estación Corregidora.



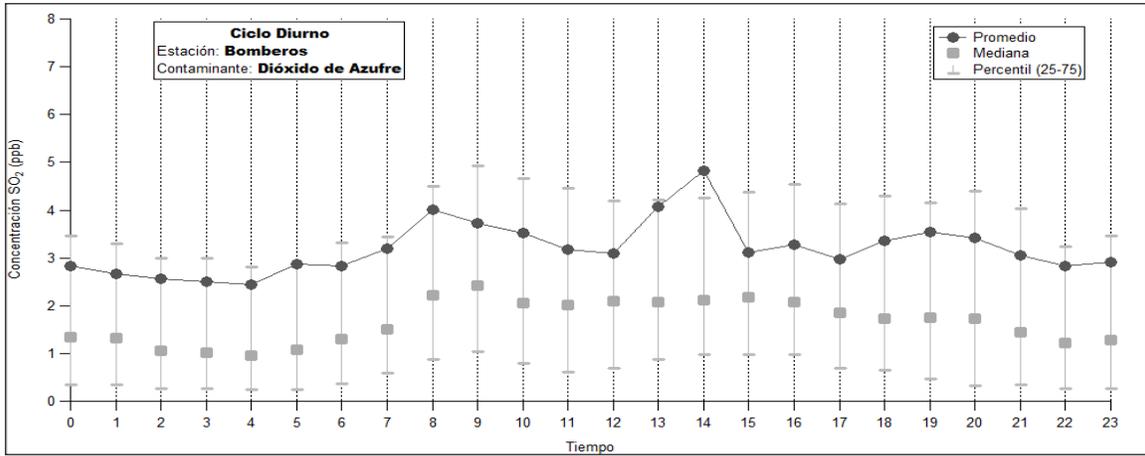
Anexo C 16. Muestra el ciclo diurno del SO₂ obtenido durante el 2013 por la estación Félix Osoreos.



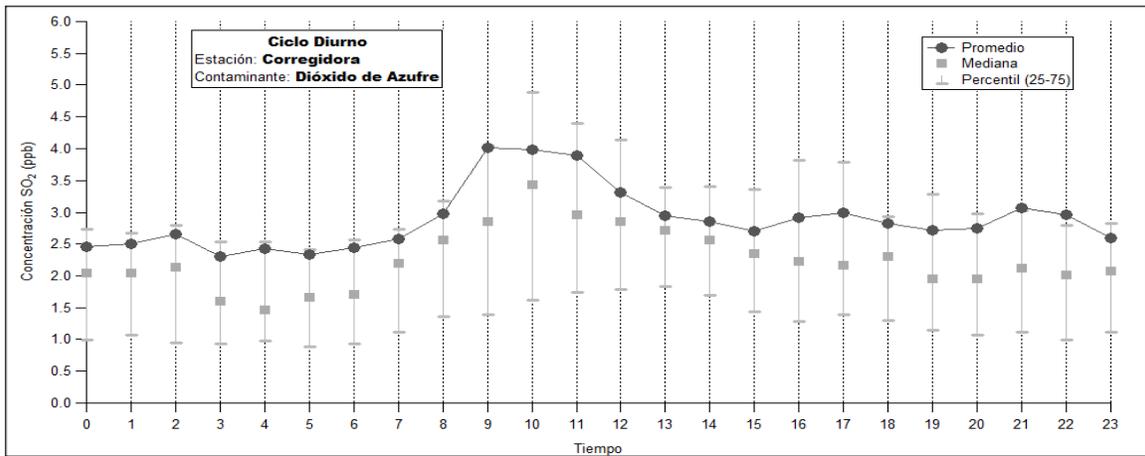
Anexo C 17. Muestra el ciclo diurno del SO₂ obtenido durante el 2013 por la estación El Marqués.



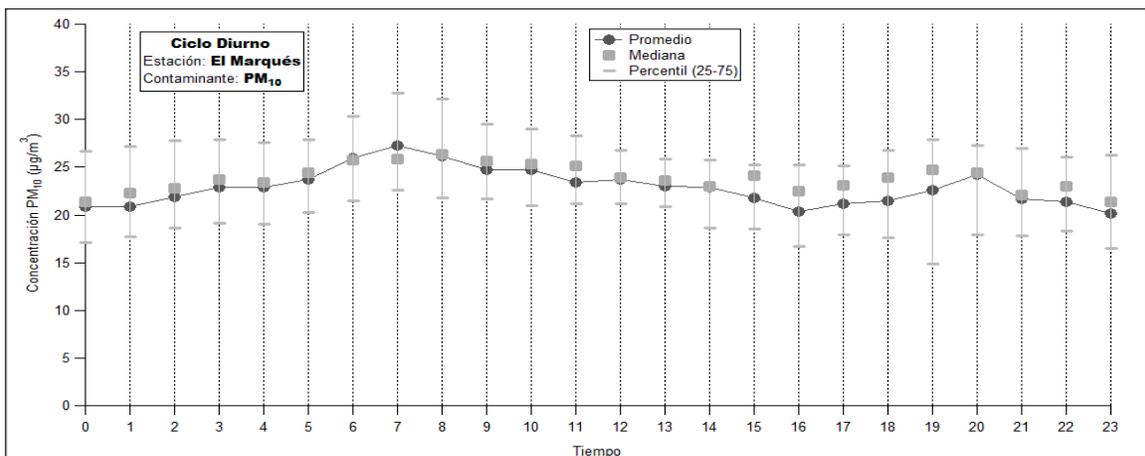
Anexo C 18. Muestra el ciclo diurno del SO₂ obtenido durante el 2013 por la estación Del. Epigmenio.



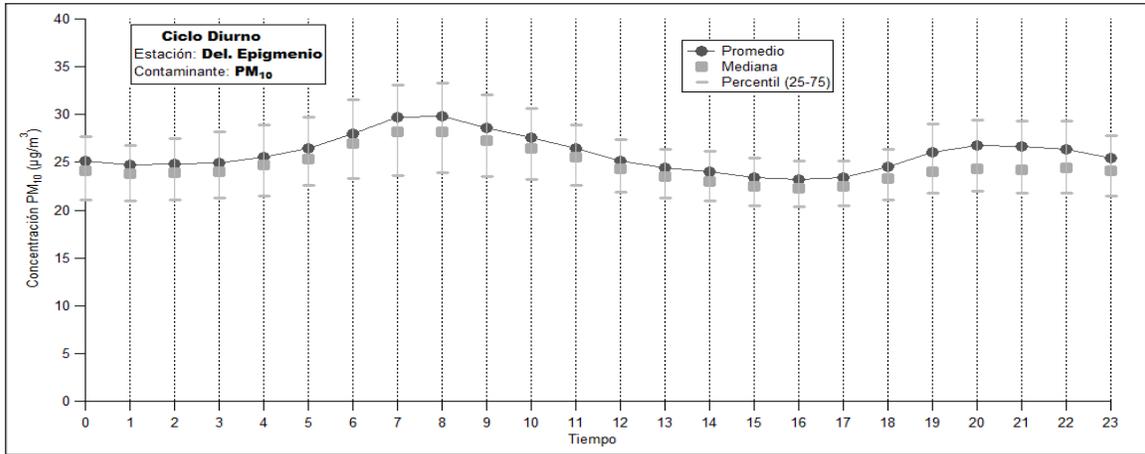
Anexo C 19. Muestra el ciclo diurno del SO_2 obtenido durante el 2013 por la estación Bomberos.



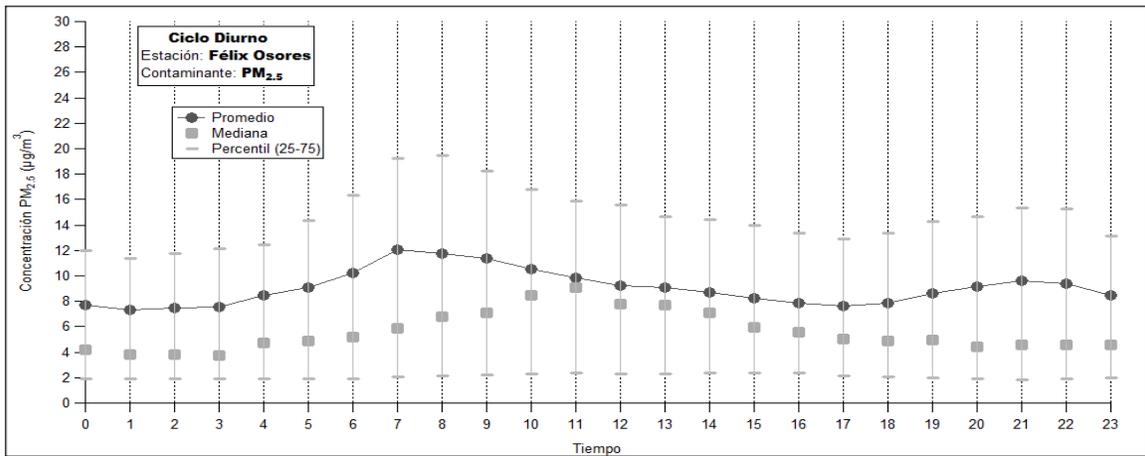
Anexo C 20. Muestra el ciclo diurno del SO_2 obtenido durante el 2013 por la estación Corregidora.



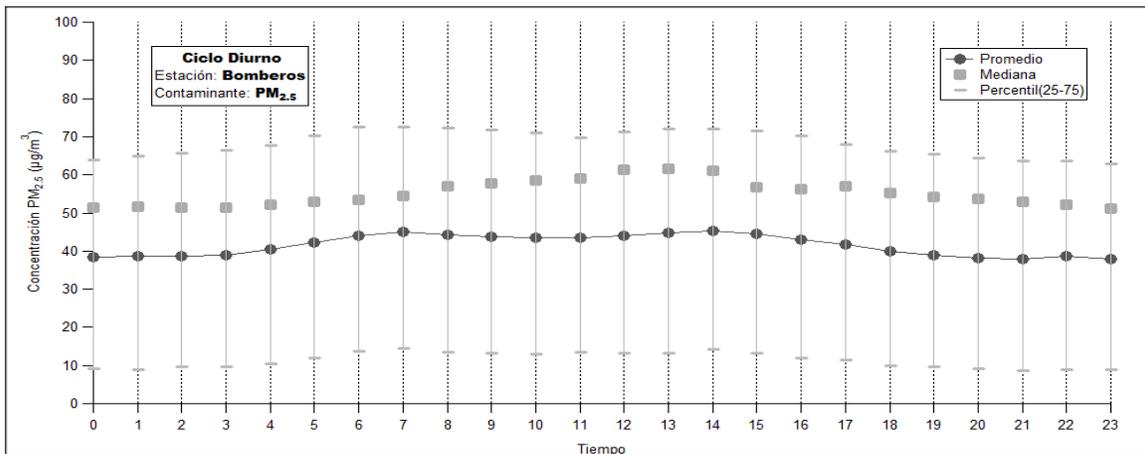
Anexo C 21. Muestra el ciclo diurno del PM_{10} obtenido durante el 2013 por la estación El Marqués.



Anexo C 22. Muestra el ciclo diurno del PM₁₀ obtenido durante el 2013 por la estación Del Epigmenio.

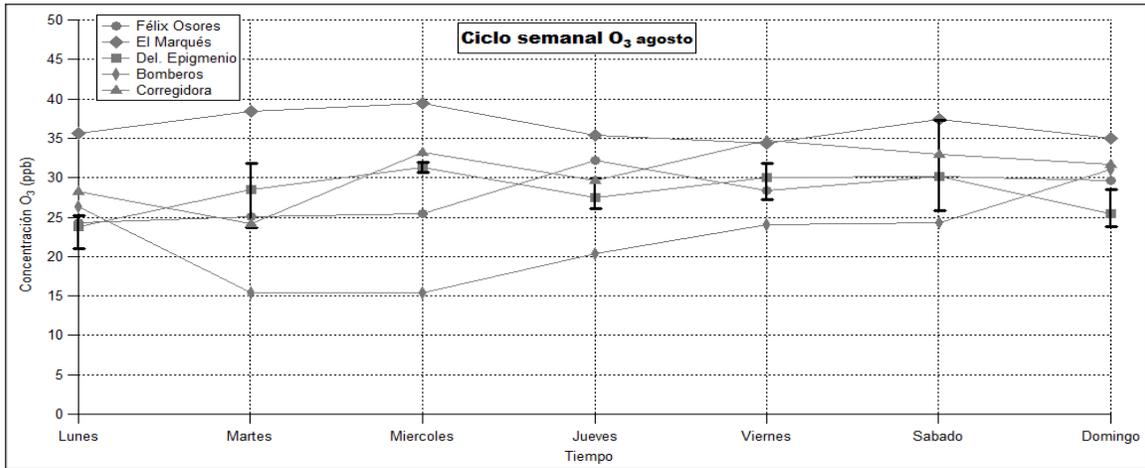


Anexo C 23. Muestra el ciclo diurno del PM_{2.5} obtenido durante el 2013 por la estación Félix Osoros.

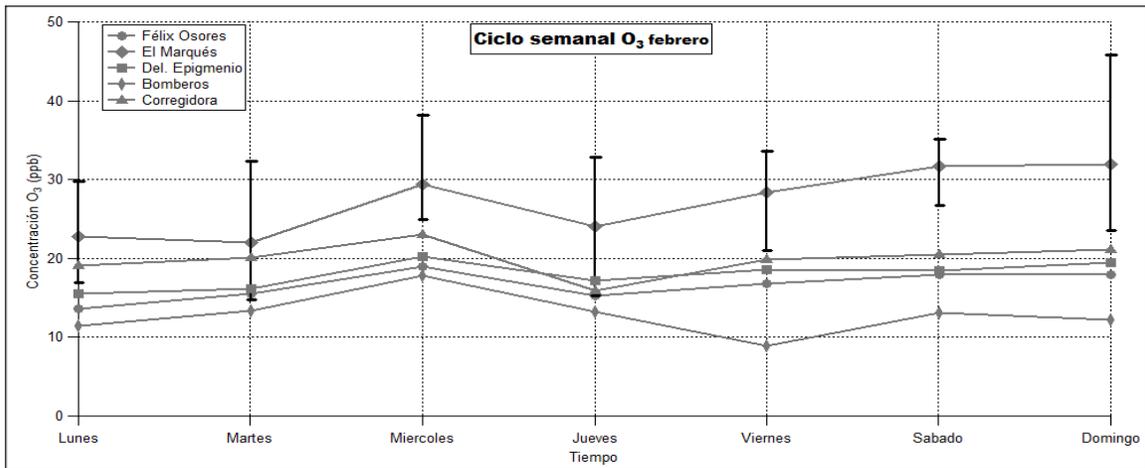


Anexo C 24. Muestra el ciclo diurno del PM_{2.5} obtenido durante el 2013 por la estación Bomberos.

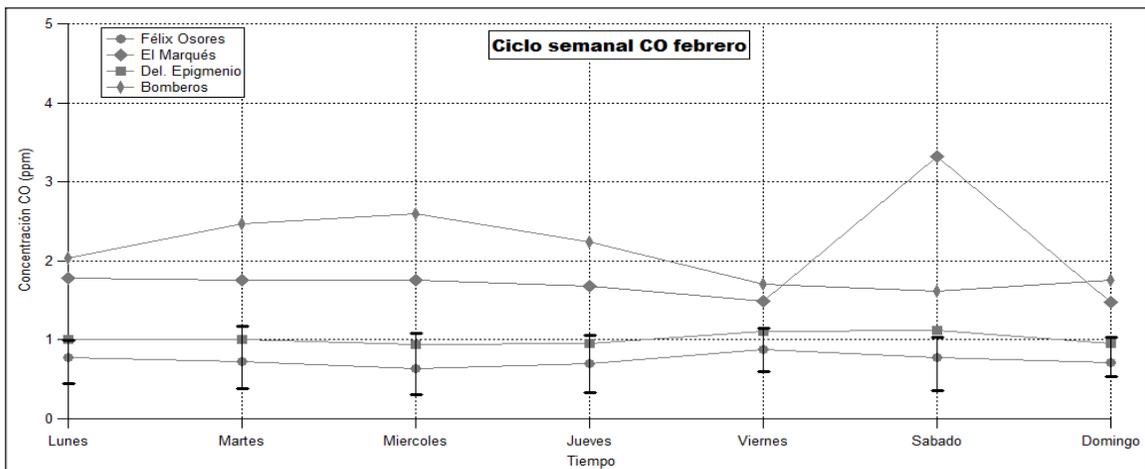
Sección D: Ciclo semanal



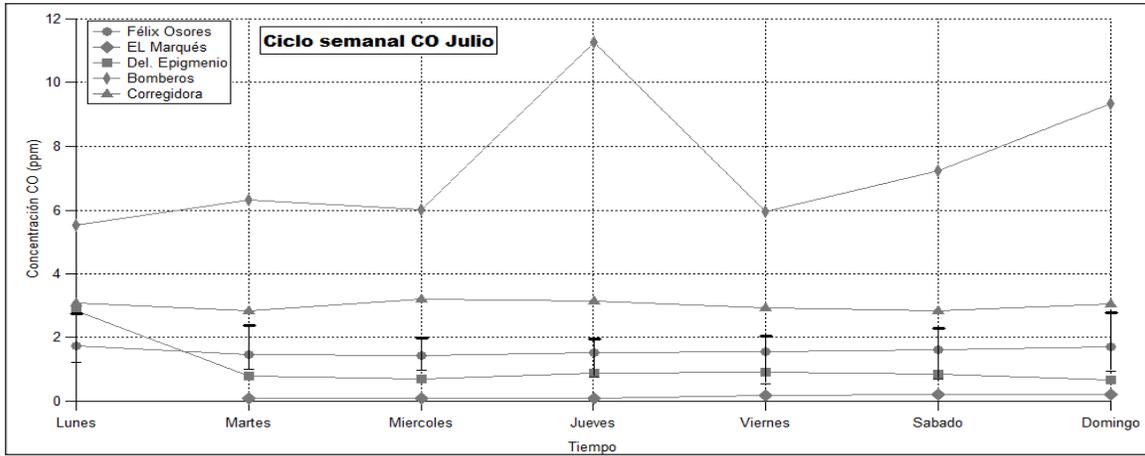
Anexo D 1. Muestra el ciclo semanal del O₃ obtenido durante agosto por todas las estaciones.



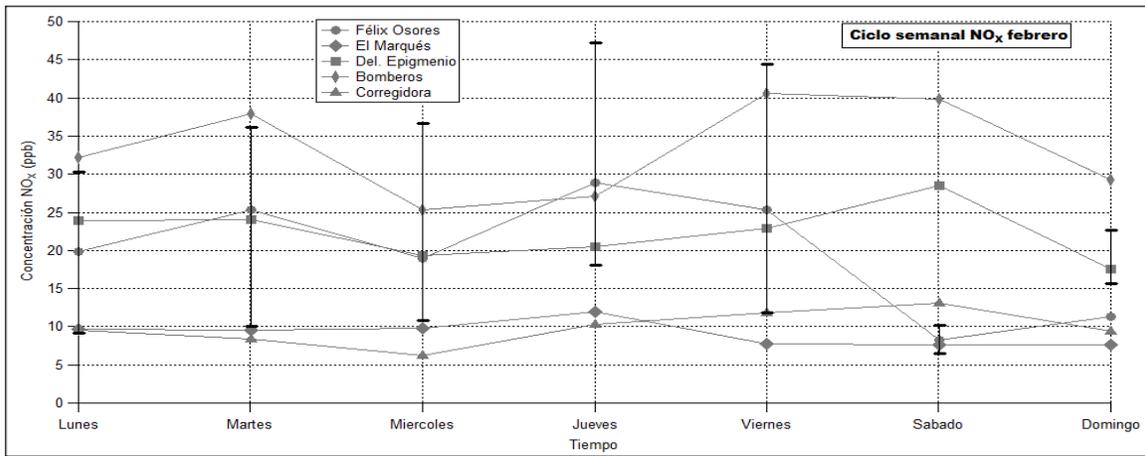
Anexo D 2. Muestra el ciclo semanal del O₃ obtenido durante febrero por todas las estaciones.



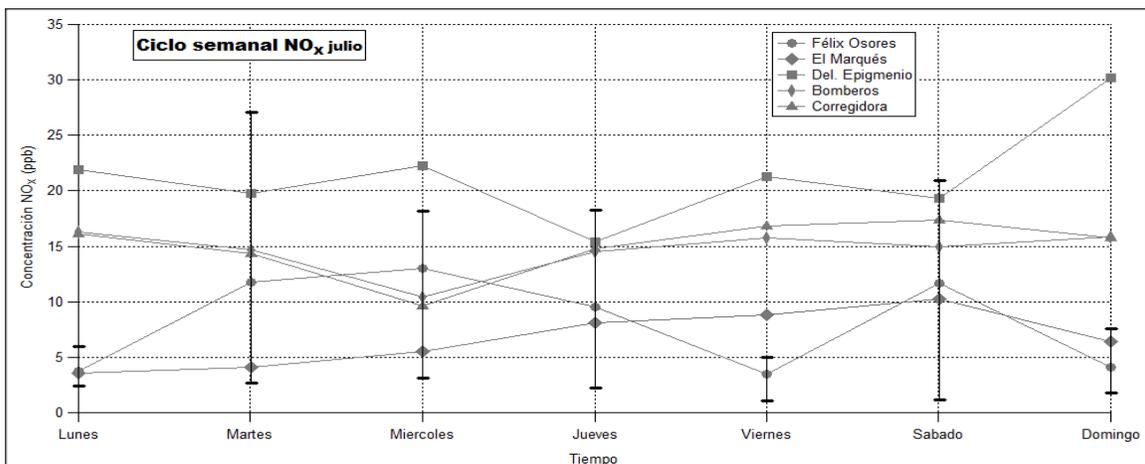
Anexo D 3. Muestra el ciclo semanal del CO obtenido por todas las estaciones durante el mes de febrero.



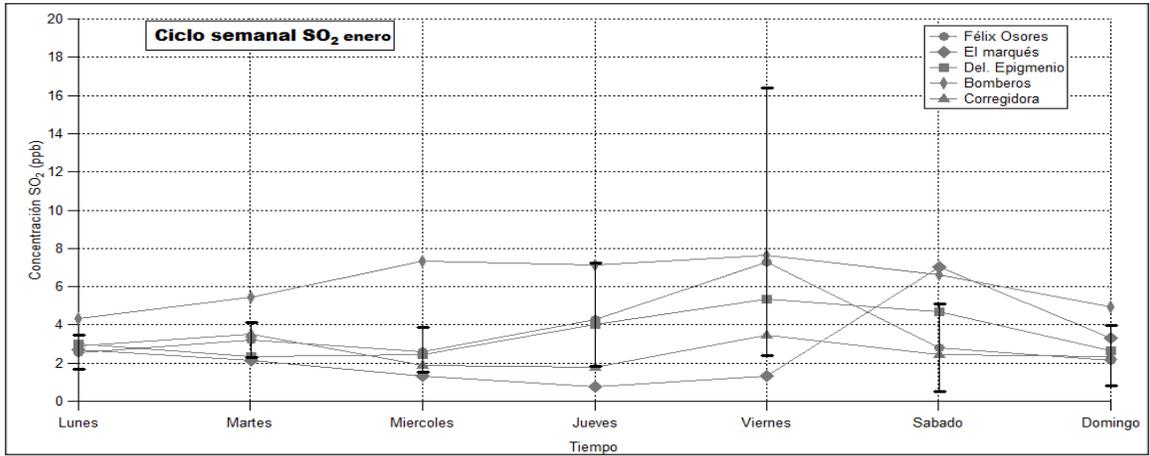
Anexo D 4. Muestra el ciclo semanal del CO obtenido por todas las estaciones durante el mes de julio.



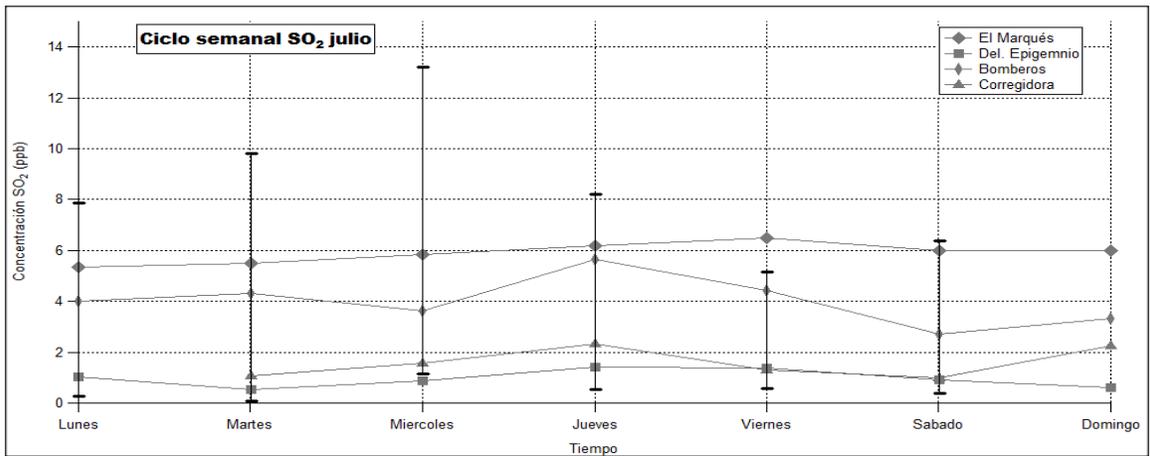
Anexo D 5. Muestra el ciclo semanal del NOx obtenido por todas las estaciones durante el mes de febrero.



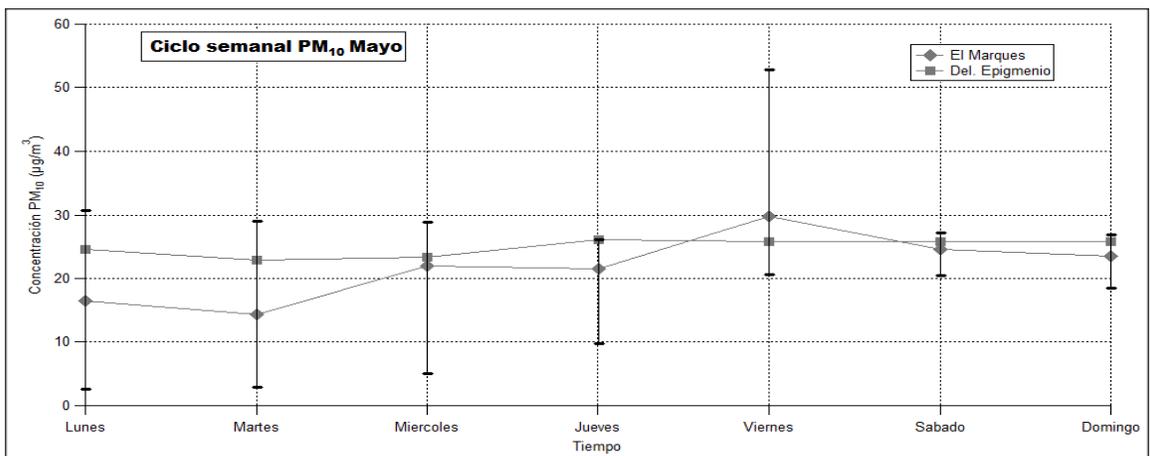
Anexo D 6. Muestra el ciclo semanal del NOx obtenido por todas las estaciones durante el mes de julio.



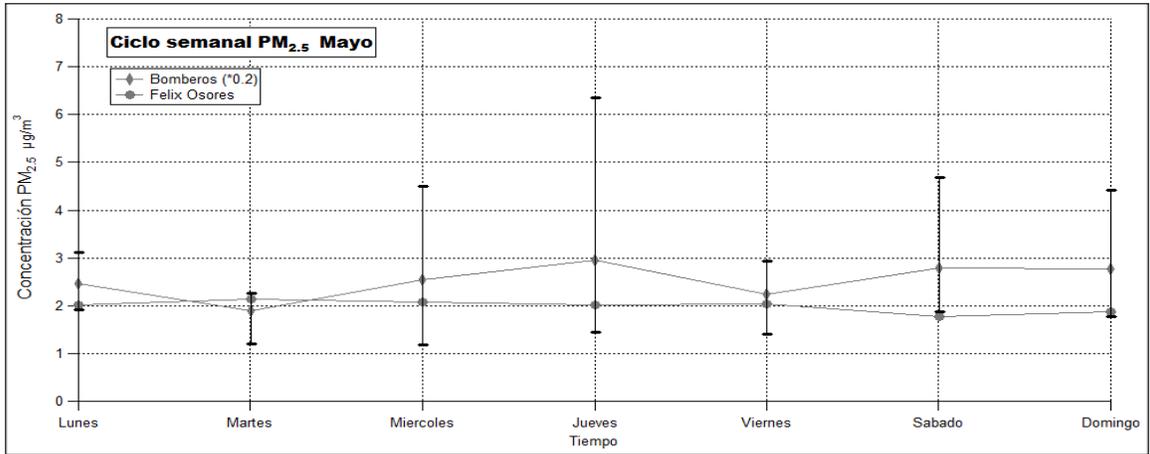
Anexo D 7. Muestra el ciclo semanal del SO₂ obtenido por todas las estaciones durante el mes de enero.



Anexo D 8. Muestra el ciclo semanal del SO₂ obtenido por todas las estaciones durante el mes de julio.

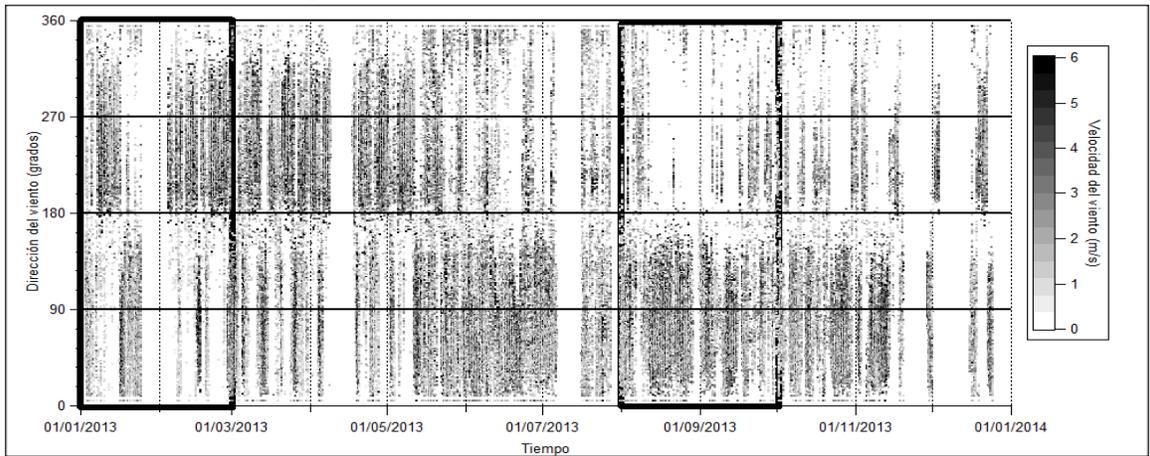


Anexo D 9. Muestra el ciclo semanal del PM₁₀ obtenido por todas las estaciones durante el mes de mayo.

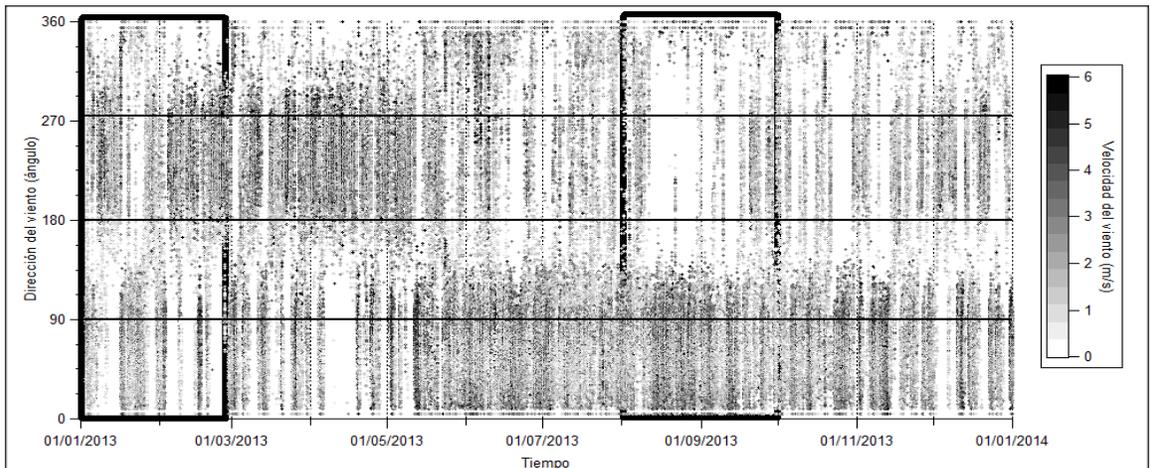


Anexo D 10. Muestra el ciclo semanal del PM_{2.5} obtenido por todas las estaciones durante el mes de mayo.

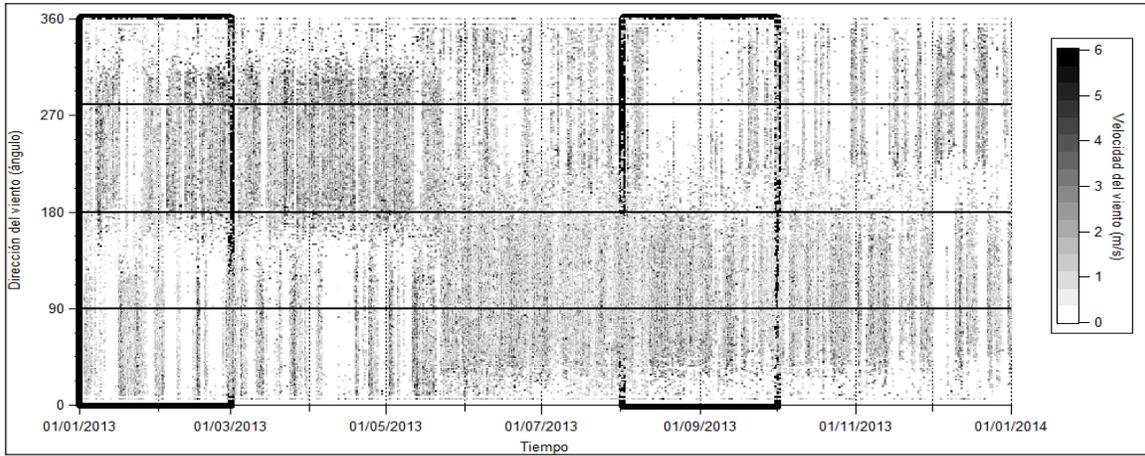
Sección E: Dirección y Velocidad del viento



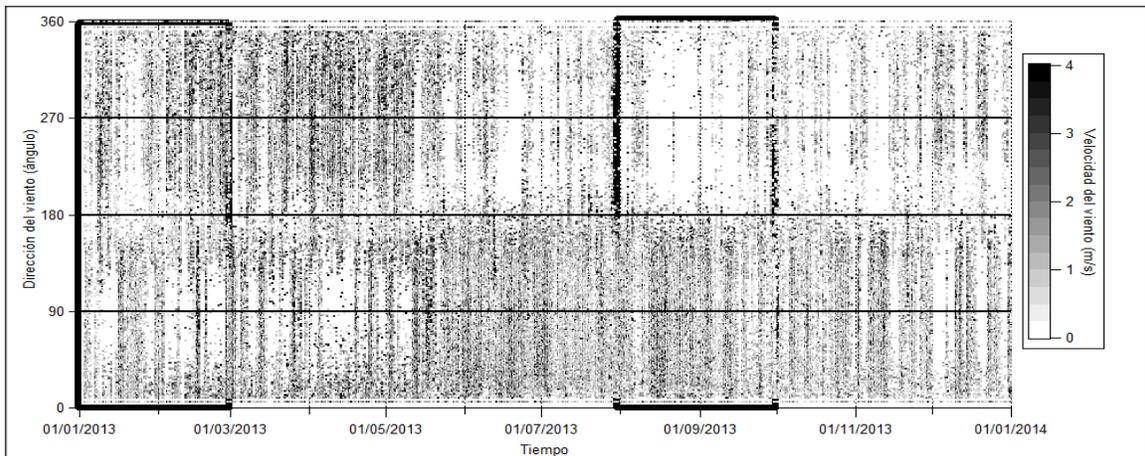
Anexo E 1. Muestra las direcciones y velocidades del viento registradas en la estación Chulavista durante el año.



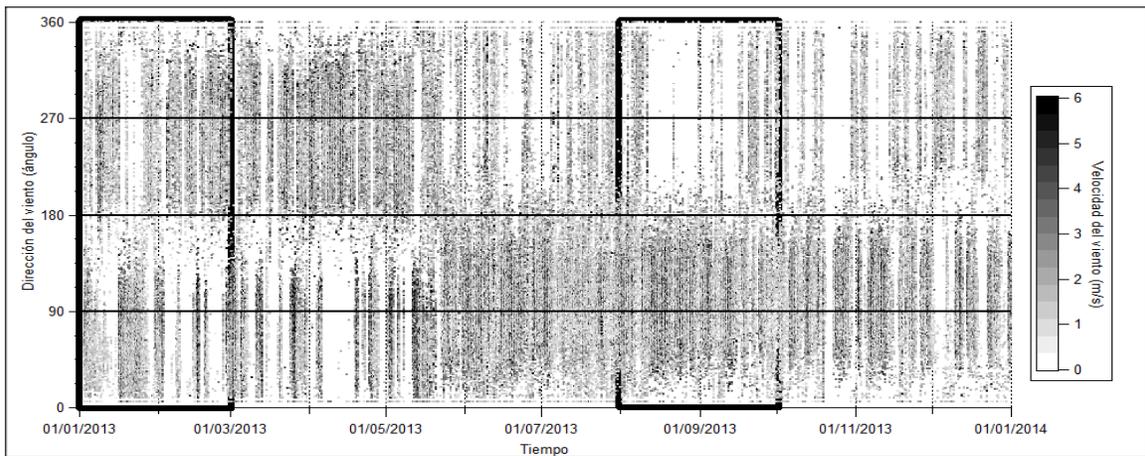
Anexo E 2. Muestra las direcciones y velocidades del viento registradas en la estación Belén durante el año.



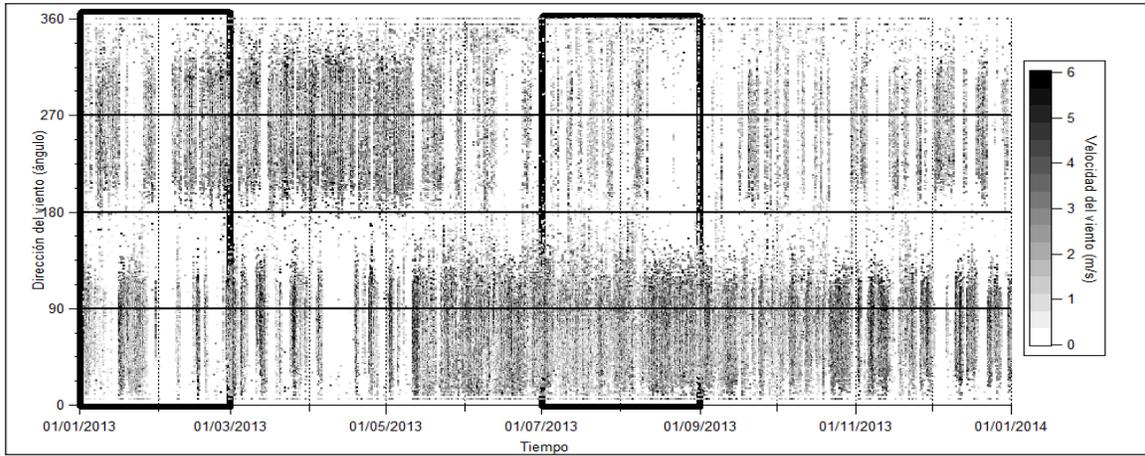
Anexo E 3. Muestra las direcciones y velocidades del viento registradas en la estación Real del Parque durante todo el año.



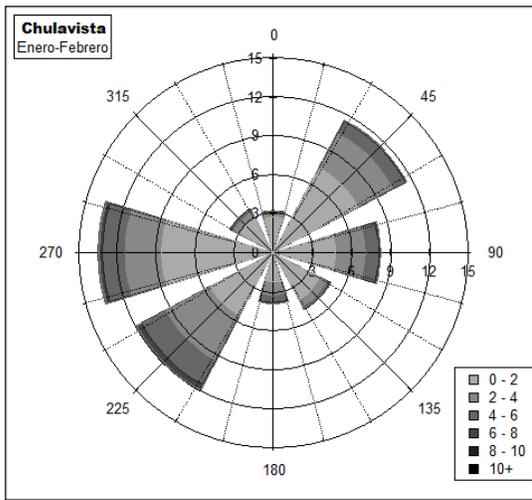
Anexo E 4. Muestra las direcciones y velocidades del viento registradas en la estación Candiles durante todo el año.



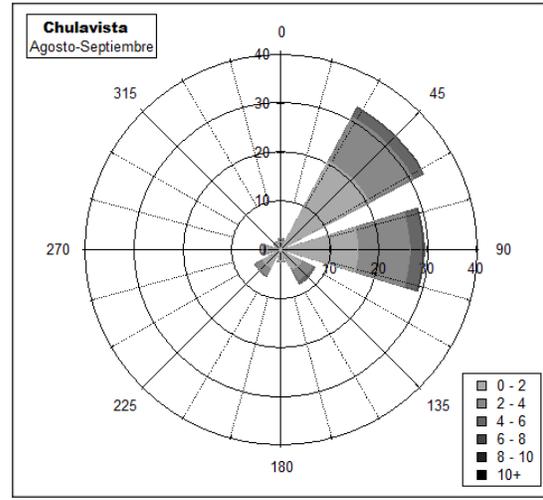
Anexo E 5. Muestra las direcciones y velocidades del viento registradas en la estación Centro Histórico durante todo el año.



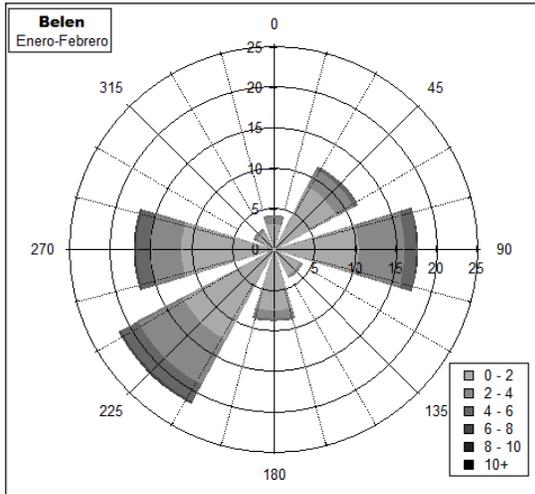
Anexo E 6. Muestra las direcciones y velocidades del viento registradas en la estación Milenio durante todo el año.



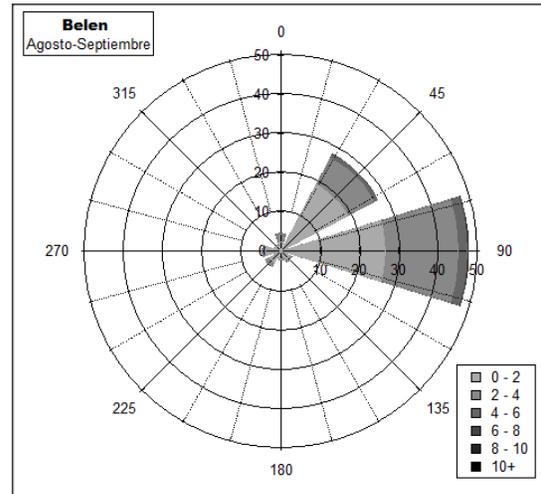
Anexo E 8. Muestra las direcciones y velocidades del viento registradas en la estación Chulavista durante los meses de enero-febrero



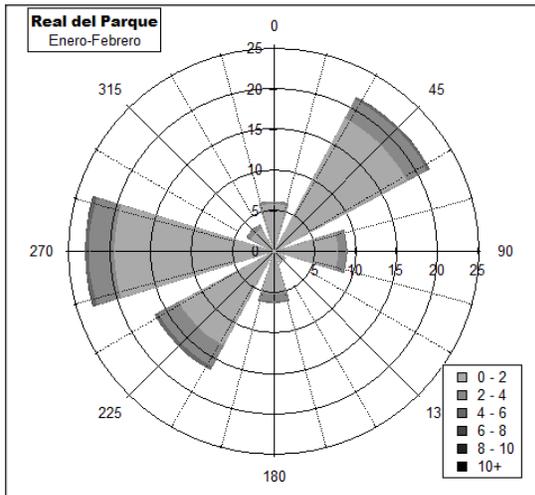
Anexo E 7. Muestra las direcciones y velocidades del viento registradas en la estación Chulavista durante los meses agosto-septiembre.



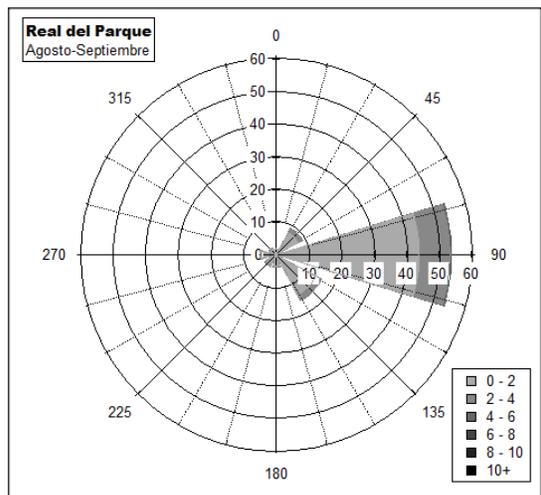
Anexo E 10. Muestra las direcciones y velocidades del viento registradas en la estación Belén durante los meses de enero-febrero.



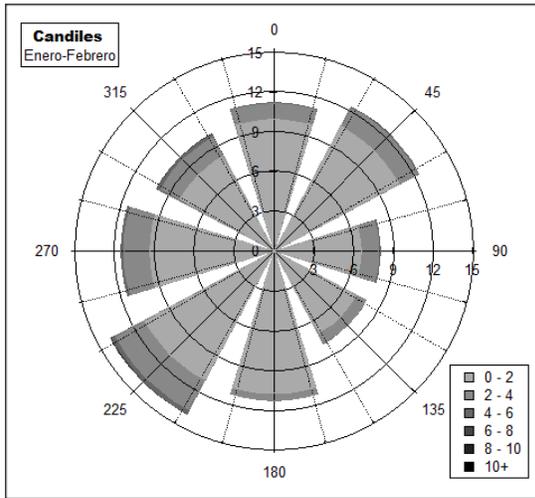
Anexo E 9. Muestra las direcciones y velocidades del viento registradas en la estación Belén durante los meses de agosto-septiembre.



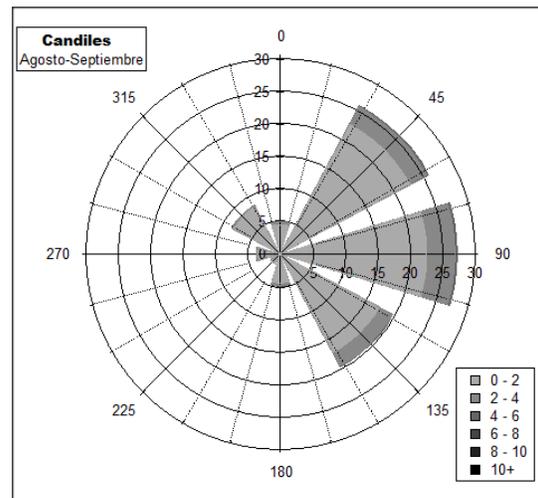
Anexo E 11. Muestra las direcciones y velocidades del viento registradas en la estación Real Parque durante los meses de enero-febrero.



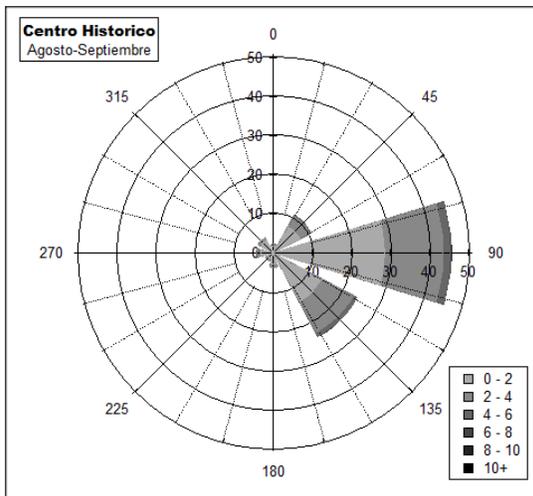
Anexo E 12. Muestra las direcciones y velocidades del viento registrados en la estación Real Parque durante los meses de agosto-septiembre.



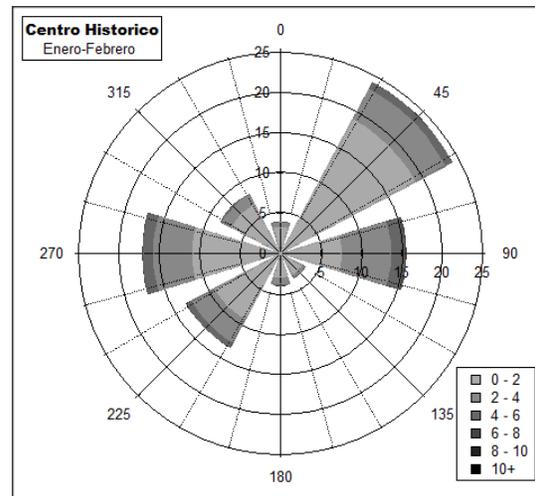
Anexo E 14. Muestra las direcciones y velocidades del viento registradas en la estación Candiles durante los meses de enero-febrero



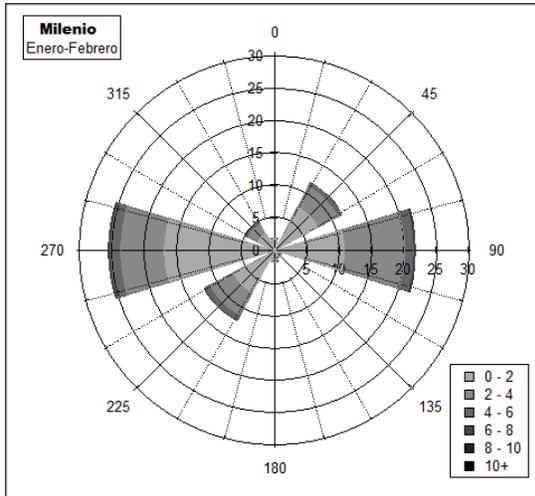
Anexo E 13. Muestra las direcciones y velocidades del viento registradas en la estación Candiles durante los meses de agosto-febrero.



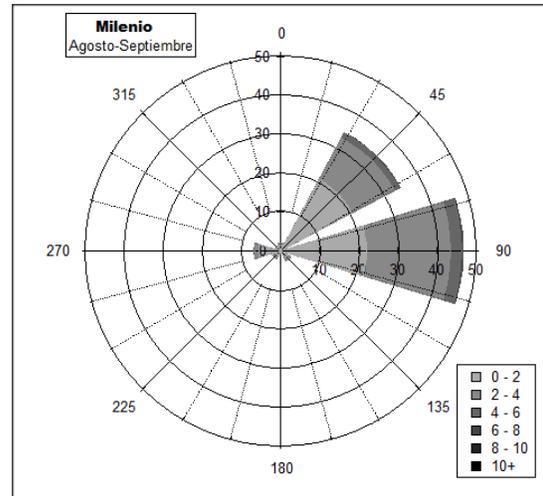
Anexo E 16. Muestra las direcciones y velocidades del viento registradas en la estación Centro Histórico durante los meses de enero-febrero.



Anexo E 15. Muestra las direcciones y velocidades del viento registradas en la estación Centro Histórico durante los meses de agosto-septiembre.



Anexo E 18. Muestra las direcciones y velocidades del viento registradas en la estación Milenio durante los meses de enero-febrero.



Anexo E 17. Muestra las direcciones y velocidades del viento registradas en la estación Milenio durante los meses de agosto-septiembre.

Bibliografía:

- Ahrnes, C. D. (2009). *Meteorology today an introducción to weather climate and the environment*. Canada: CENGAGE Learning.
- Airpointer.com*. Recuperado el (24 de Mayo de 2016). Obtenido de compact air quality monitoring - airpointer, type approved compact air quality monitoring system: <https://www.airpointer.com/#sc-tabs-1464112725892>
- Baird C., 2001. *Química Ambiental*. Barcelona: Reverté.
- Baron, P. A., & Willeke, K. (2001). *Aerosol Measurement: Principles, techniques and applications*. United States of America: Willey Interscience .
- EPA, 2016. *Technology Transfer Network - Ambient Monitoring Technology Information Center*. Recuperado el (4 de agosto de 2016). Obtenido de <https://www3.epa.gov/ttn/amtic/>
- Galán, D., & Fernandez, R. (2006). IMPLICATION OF THE NO_x IN THE ATMOSPHERIC CHEMISTRY. *Revista Electrónica de Medioambiente UCM.*, (X), 98.
- García, 2013. *Definición de los requisitos para la identificación y control de fuentes fijas en emisiones a la atmósfera*. (Tesis de pregrado). Universidad Tecnológica de Querétaro. Querétaro, México.
- Grandjean, E. 1976. *Effects of air pollution on health*. *Sozial- Und Präventivmedizin SPM*, 21(2-3), 73–76. <http://doi.org/10.1007/BF02021236>.
- Hernandez, 2007. *La aplicación de modelos de dispersión en la evaluación del impacto en la calidad del aire por instalaciones industriales* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.
- Hidalgo, J. Z. *Energía Cinética, Turbulencia*. Recuperado el (14 de 07 de 2016). Obtenido de <http://www.atmosfera.unam.mx/jzavala/OceanoAtmosfera/2014/EnergiaCineticaTurbulenta.pdf>
- Hinds, W. C. (1998). *Aerosol Technology: Properties, behavior an measurement of airborne particles*. Unites States of America: A Willey- Interscience publication.
- INECC, 2010A . *Manual 3, Redes estaciones y equipos de medición de la calidad del aire*. Ciudad de México: Insituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- INECC, 2010B. *Manual 5 . Protocolo de Manejo de Datos de Calidad del Aire*. México D.F.
- INEGI, 2015. *México en Cifras*. S.F. Recuperado el 23 de Junio de 2015. Obtenido de <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?e=22>
- Jacobson, 2002. *Atmospheric Pollution: History, science and regulation*. Reino Unido: Cambringe.
- Katsouyanni, K. 2011. Short- Term Effects of air pollution on health. *Sozial- Und Präventivmedizin SPM*, 21(2-3), 73–76. <http://doi.org/10.1007/BF02021236>
- LGEEPA, 2015. Ley N° 207. Diario Oficial de la Federación, Ciudad de México, México, 28 de enero de 1988.

- Levy, 2015. Carbon monoxide pollution and neurodevelopment: A public health concern. *Neurotoxicology and Teratology*, 49, 31–40. <http://doi.org/10.1016/j.ntt.2015.03.001>
- Lezama, J. L. (2010). *Los Grandes Problemas de México, Medio Ambiente*. México DF.: El Colegio de México.
- Lutgens, F. K., & Tarbuck, E. (2013). *The Atmosphere an introduction to meteorology*. Estados Unidos de America: PEARSON.
- Manahan, S. E. (2007). *Introducción a la Química Ambiental* . México Distrito Federal : Reverté.
- McElroy, F. (1997). *Determination of ozone by ultraviolet analysis*. U.S.: Environmental Protection Agency.
- Moragues, D. J. *Clasificación de estabilidad, capa de mezcla* . Recuperado el (4 de agosto de 2016) Obtenido de <http://www.ceiucaweb.com.ar/documentos/2-ambiental/3er-anio-1er-cuatri/meteorologia/apunte/capa%20de%20mezcla.pdf>
- OMS, 2013. *Prevención y control de enfermedades no transmisibles, Directrices para la atención primaria en entornos con pocos recursos*. Ginebra, Suiza.
- OPS/OMS, O. P. *Curso de autoinstrucción, conceptos básicos sobre la meteorología de la contaminación del aire*. Recuperado el (13 de 07 de 2005). Obtenido de http://www.bvsde.paho.org/cursoa_meteoro/index.html
- Patier, 2016. *Metodología de evaluación de la calidad*. Madrid, España: Real Academia Nacional de Farmacia.
- Pickering, W. F.,1980. *Química Analítica Moderna* . Barcelona, España: Reverté.
- Pope et.al. 2006. *Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect*. Journal of the Air & Waste Management Association, 56(10), 1368–1380. Obtenido de <http://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464545>.
- Raaschou-Nielsen, et.al. 2016. *Particulate matter air pollution components and risk for lung cancer*. Environment International, 87, 66–73. Obtenido de: <http://doi.org/10.1016/j.envint.2015.11.007>
- Raub, et.al. 2000. *Carbon monoxide poisoning - a public health perspective*. Toxicology, 145(1), 1–14. Obtenido del: [http://doi.org/10.1016/S0300-483X\(99\)00217-6](http://doi.org/10.1016/S0300-483X(99)00217-6)
- Rodríguez Valdés, et. al., 2015. *Variación de la estabilidad y altura de la capa de mezcla en la ciudad de Pinar del Río: su relación con condiciones sinópticas.*, 30(1), 1–15. Obtenido de: <http://doi.org/10.1590/0102-778620140014>
- SCT, 2014. Secretaría de comunicaciones y transportes. *Inventario de bancos de materiales 2014*. Querétaro
- SEDEMA, 2015. Secretaría del Medio Ambiente del Distrito Federal. *Calidad del aire en la Ciudad de México, informe 2014*. México, Distrito Federal: Dirección General de Gestión de calidad del aire, Dirección de Monitoreo Atmosférico.

- SEDESU, 2014. Secretaría de Desarrollo Sustentable. *Programa de gestión para mejorar la calidad del aire de la zona Metropolitana de Querétaro- San Juan del Río 2014-2023*. Santiago de Querétaro, Querétaro: SEMARNAT.
- SEDESU, 2015. *Parques Industriales*. Recuperado le (23 de Junio de 2015). Obtenido de <http://www.queretaro.gob.mx/sedesu/contenido.aspx?q=Jv2m+h8F36QTzG0qQQL9nqbwKM+iYkP>
- SMN, 2014. Servicio Meteorológico Nacional. *CANICULA EN MÉXICO: Caracterización, resumen 2013 y perspectiva 2014*. Ciudad de México: CONAGUA.
- SSA, 1994A. Secretaría de Salud. Salud ambiental. *Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de nitrógeno (NO₂)*. Valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO₂) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población. NOM-023-SSA1-1993. México, D.F. 1994. 3p.
- SSA, 1994B. Secretaría de Salud. *Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (CO)*. Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. NOM-021-SSA1-1993 México, D.F. 1994.
- SSA, 2010. Secretaría de Salud. *Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO₂)*. Valor normado para la concentración de dióxido de azufre (SO₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. NOM-022-SSA1-2010. México, D.F. 2010. 8p.
- SSA, 2014A. Secretaría de Salud. *Salud ambiental. Valor límite permisible para la concentración de ozono (O₃) en el aire ambiente y criterios para su evaluación*. NOM-020-SSA1-2014. México, D.F. 2014 .8p.
- SSA, 2014B. Secretaría de Salud. *Salud ambiental. Valores límite permisible para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente y criterios para su evaluación*. NOM-025-SSA1-2014. México, D.F. 2014.12p.
- SSA, 2016. Secretaría de Salud (12 de 07 de 2016). *gob.mx*. Obtenido de <http://www.gob.mx/salud/documentos/normas-oficiales-mexicanas-9705>
- Stull, R. B. (1988). *An introduction to Boundary Layer Meteorology* . Vancouver, Canada: KLUWER ACADEMIC PUBLISHERS.
- Thermo FisherScientific, 2007, 2007. *Instruction Manual, Gas Filter Correlation CO Analyzer* . Franklin : Thermo Fisher Scientific .
- Villarejo, A. L. *NO_x, COV y CFC: Química de la formación y destrucción del ozono atmosférico*. Recuperado el (8 de agosto de 2016). Obtenido de <http://ebook.ranf.com/ozono/files/assets/basic-html/page47.html>
- Wagner P. et.al., 2015. *Influence of mixing layer height on air pollutant concentrations in an urban street canyon*. URBAN CLIMATE, 1–13. <http://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.11.00>.

Wang, et.al, 2014. *Sulfur dioxide, a double-faced molecule in mammals*. Life Sciences, 98(2), 63–67.
<http://doi.org/10.1016/j.lfs.2013.12.027>.

Warneck P. ,2000). *Chemistry of the natural atmosphere*. Mainz Germany: Academic Press .