

# Estimating AOD and its comparison with satellite data and PM<sub>10</sub> measured in Monterrey, Mexico

A. Ipiña<sup>1</sup>, G. López-Padilla<sup>2</sup>, C. Zúñiga<sup>2</sup>

1. Instituto de Física Rosario (IFIR) – Universidad Nacional Rosario – Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, 27 de Febrero 210BIS – (S2000EKF) Rosario – Argentina.
2. Facultad de Ciencias Físico Matemáticas – Universidad Autónoma de Nuevo León, Pedro de Alba S/N - Ciudad Universitaria San Nicolás de los Garza (66451) – México.

## Abstract

La profundidad óptica de aerosol a 550nm (AOD<sub>550nm</sub>) es una medida empleada para conocer la cantidad de partículas suspendidas en la atmósfera, desde una dada altura hasta la superficie terrestre. El material particulado de tamaño menor o igual a 10 micrómetros se denomina PM<sub>10</sub> y su concentración es medida a nivel del suelo. Estas partículas interactúan con la radiación solar causando efectos de dispersión, scattering y absorción provocando así una disminución de intensidad con respecto a la original. Con la ayuda del modelo SMARTS (Simple Model of the Atmospheric Radiative Transfer of Sunshine) y mediciones de irradiancia solar VIS+NIR (285-2800nm) del Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA) del Estado de Nuevo León, se estimaron los valores del AOD<sub>550nm</sub> para días de cielo despejado en el periodo 2016-2020. Estos resultados fueron comparados con mediciones de AOD<sub>550nm</sub> (Collection 6.1) realizadas con el instrumento satelital MODIS-NASA para las mismas fechas, sobre el Área Metropolitana de Monterrey. Los valores del AOD<sub>550nm</sub> derivado del modelo tienen mínimos en invierno y máximos en verano, en un rango entre 0.1 y 0.6 respectivamente. Mientras que en el caso satelital tiene el mismo comportamiento con máximos alcanzando el valor de 0.8. Además estos valores fueron correlacionados con mediciones de PM<sub>10</sub> realizadas por las mismas estaciones meteorológicas del SIMA. Se discute el origen de las fuentes de aerosol y la correlación entre ambos resultados.

## 1. Introduction

Particulate matter (PM), or aerosol, is the set of suspended liquid or solid particles found in the atmosphere. The most relevant to human health are the ones with a diameter smaller than 10  $\mu\text{m}$  (PM<sub>10</sub>) and smaller than 2.5  $\mu\text{m}$  (PM<sub>2.5</sub>). With these sizes PM is capable of entering our respiratory and circulatory system, causing cardiovascular, respiratory and pregnancy problems, and even can increase the risk of pulmonary cancer and mortality [Mukherjee and Agrawal, 2017]. PM can also affect visibility, cloud formation and produce damage to ecosystems and cultural sites [von Schneidemesser et al., 2015].

The Monterrey Metropolitan Area (MMA) has a severe air pollution problem, with an average annual concentration of PM higher than the Official Mexican Standard (NOM) in all stations since 2000 [Martínez-Cinco et al., 2016]. The “Sistema de

Monitoreo Ambiental” (SIMA) is the institute that since 1992 reports and shares data on air pollution over the MMA from its current 13 monitoring stations. According to its 2019 air quality report, more than half of the year the  $PM_{10}$  standard is exceeded, so it can be concluded that it is the main pollutant in the area. The same conclusion that can be reached with the results of Benítez-García [Benítez-García et al., 2014] and the National Institute of Ecology and Climate Change [INECC, 2011, INECC, 2019]. Meanwhile,  $PM_{2.5}$  has data recording problems in most of the monitoring stations, even though it is known it involves higher health risks. Some of the consequences of high PM levels are already beginning to be noticed, such as the loss of visibility in the city at certain times of the day and premature deaths from PM have an average cost of 1 % of the country’s gross domestic product [ITDP & ICM, 2019].

Several temporal analyses of PM have been done and also studies trying to pinpoint the sources of this pollutant, either by chemical characterization and emissions inventories analysis. However, little research has been done taking into account the Aerosol Optical Depth, that has the advantage of measuring the whole vertical area of the atmosphere, and not only near the Earth surface. That’s why the aim of this study is to examine PM trends by comparing PM data measured on ground by SIMA, Aerosol Optical Depth (AOD) estimated by solar irradiance measurements and AOD data from NASA’s MODIS satellite. We hope to contribute to the better understanding of the behavior of the pollutant in the complex physiographic zone of the MMA, since it is limited by the Northern Gulf Coastal Plain in the northeast and the Sierra Madre Oriental in the southwest.

The MMA is an industrial power in Northeast Mexico and the third largest urban area in the country. Given this and the way the urban area developed, the distribution of the PM sources is not homogeneous. The MMA includes the municipalities of Apodaca, Cadereyta, Escobedo, García, Guadalupe, Juárez, Monterrey, San Nicolás de los Garza, San Pedro, Santa Catarina and begins to extend towards Santiago with an area of 7,657 km<sup>2</sup> in 2015 [SEDATU, CONAPO & INEGI, 2015]. They all are limited by the Northern Gulf Coastal Plain in the northeast and the Sierra Madre Oriental in the southwest, which causes a downward flow of air from the mountains at night and in the early morning [Centro Mario Molina, 2019]. However, the predominant direction of the wind is from east to west and this transports the PM to the mountains, which acts as a barrier by accumulating the particles [González-Santiago et al., 2011]. A combination of the increase in wind speeds, high temperatures and humidity, is what makes PM concentrations drop in summer [González-Santiago et al., 2011, SIMA, 2019].

## 2. Material and methods

### 2.1. Study Area

El área metropolitana de Monterrey (MMA) se localiza en la parte noreste de México, con una población de 4.7 millones de personas distribuidas 18 municipios que

en total abarcan 7,657 m<sup>2</sup> [SEDATU, CONAPO & INEGI, 2015]. Las principales actividades económicas se encuentran comercio, servicios inmobiliarios, construcción y fabricación de maquinaria y equipo que se realizan 213 grupos industriales, la mayoría con sede en el MMA. El MMA está rodeado por la Sierra Madre Oriental, el Cerro de la Silla, el Cerro de las Mitras y el Cerro del Topo Chico (figura 1), las cuales crean una barrera física natural para la circulación del viento que impiden el desalojo del aire contaminado hacia el exterior de la zona.[ProAire, 2012]

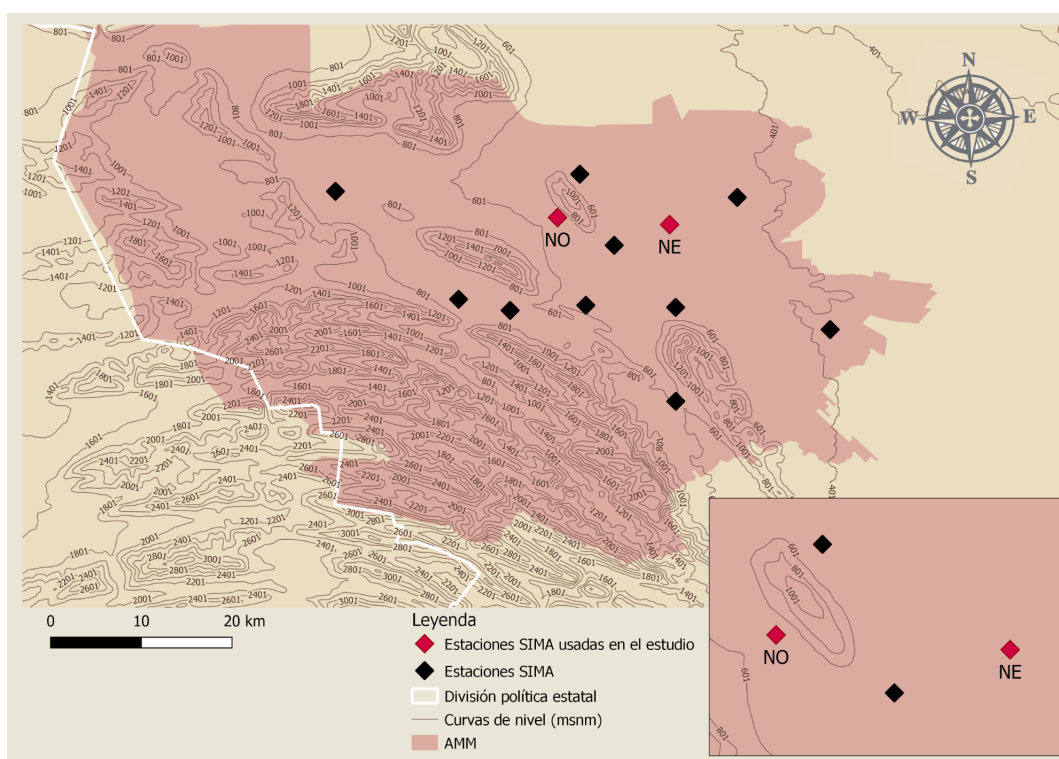


Figura 1: Área Metropolitana de Monterrey con sus principales cerros y sierras.

El Sistema Integral de Monitoreo Ambiental (SIMA) inició sus operaciones en el año 1992 con cinco estaciones de monitoreo. En el año 2017 el número de estaciones en operación aumentó a 13, siendo las estaciones Universidad, Serena y Cadereyta las últimas instaladas en este año [SIMA, 2015]. La localización geográfica y clasificación de las estaciones de monitoreo se encuentran en la Tabla 1. La clasificación de las estaciones corresponde con la descripción dada por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). [ProAire Nuevo León, 2016]

Station name	Code	Altitude (masl)	Latitude	Longitude	Classification
Obispado	CE	560	25.67	-100.34	Mixed
Escobedo	N	528	25.80	-100.34	Mixed
Universidad	N2	520	25.73	-100.31	University city
San Nicolás	NE	476	25.75	-100.26	Industrial
Apodaca	NE2	432	25.78	-100.19	Industrial
San Bernabé	NW	571	25.76	-100.37	Residential
García	NW2	716	25.78	-100.59	Industrial
Serena	S	630	25.57	-100.25	Residential
Pastora	SE	492	25.67	-100.25	Residential
Juárez	SE2	387	25.65	-100.10	Residential
Cadereyta	SE3	340	25.36	-100.00	Residential
Santa Catarina	SW	694	25.68	-100.46	Industrial
San Pedro	SW2	636	25.66	-100.41	Residential

Tabla 1: Localización geográfica y clasificación según las actividades que se realizan en la zona.

## 2.2. Meteorology, solar irradiance and PM<sub>10</sub> measurements

En la Tabla 2 se muestra el porcentaje de mediciones anuales disponibles en cada estación de la red del SIMA. En rojo se representan las estaciones que tienen un porcentaje menor a 75 %, ya que con esto se considera que las mediciones son insuficientes para una estadística anual [Centro Mario Molina, 2019].

Code	2015		2016		2017		2018		2019		2020	
	PM <sub>10</sub>	SR	PM <sub>10</sub>	SR	PM <sub>10</sub>	SR	PM <sub>10</sub>	SR	PM <sub>10</sub>	SR	PM <sub>10</sub>	SR
CE	94.6	95.8	97.0	97.7	96.8	98.2	94.8	99.1	95.1	94.5	92.8	96.5
N	76.8	98.8	98.1	97.9	93.0	96.6	94.1	97.6	96.3	99.9	73.7	84.3
N2	-	-	-	-	20.9	25.1	94.3	98.6	94.4	98.8	92.3	99.1
NE	93.9	83.9	98.3	96.9	98.1	99.2	97.4	99.8	98.5	99.5	92.8	89.3
NE2	89.9	98.3	93.7	99.9	96.3	99.8	96.1	99.4	94.5	99.1	91.1	98.1
NW	95.3	99.3	98.1	94.9	98.5	99.7	94.9	99.5	90.9	94.4	96.5	98.7
NW2	83.8	97.7	84.3	88.5	95.7	99.0	96.6	99.5	95.8	98.2	96.4	99.4
S	-	-	-	-	22.8	23.7	92.9	99.4	96.7	99.6	94.8	99.9
SE	92.8	98.6	97.2	99.0	98.4	99.1	94.3	98.5	95.9	98.4	94.1	99.1
SE2	95.9	99.6	99.1	100.0	95.7	97.4	92.4	99.6	95.8	64.2	90.3	99.7
SE3	-	-	-	-	37.1	38.6	95.1	99.1	98.3	99.8	94.1	99.7
SW	92.3	97.2	96.9	98.7	97.9	99.6	92.6	99.2	97.9	99.6	97.0	99.6
SW2	88.4	96.5	96.8	98.6	93.6	98.1	95.1	99.5	96.7	99.7	90.8	99.9

Tabla 2: Porcentaje anual de las mediciones de PM<sub>10</sub> e irradiancia solar de las estaciones del SIMA en el periodo 2015-2020.

Se seleccionaron las estaciones de San Nicolás y San Bernabé ya que el radiómetro instalado es el Pyranometer Model 095, el radiómetro mide en el rango 285nm a 2800nm. Se realizó un catálogo de los datos de irradiancia solar para obtener los días de cielo despejado, el criterio de clasificación consiste en graficar la irradiancia solar a lo largo de las horas y si forma una función gaussiana (figura 2) entonces el conjunto de datos representa un cielo despejado. En cada estación de monitoreo no necesariamente miden sin nubosidad al mismo tiempo, esto provoca que la selección de días de cielo despejado no sea la misma en todas las estaciones.

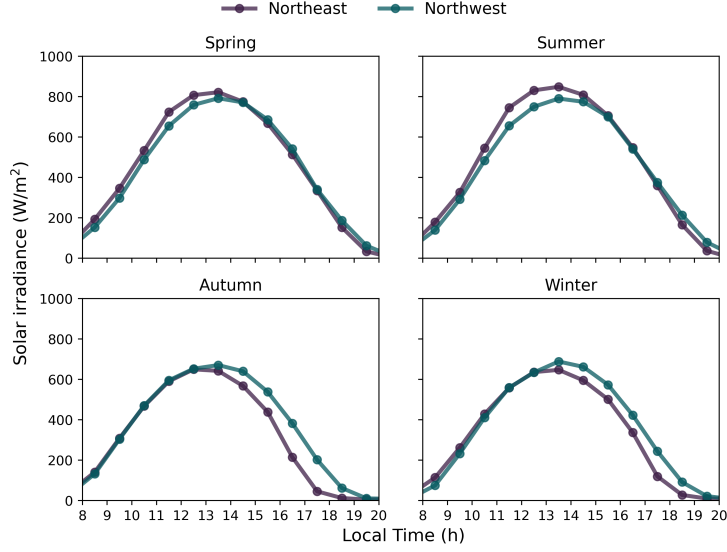


Figura 2: Promedio de la irradiancia solar para cada epoca del año en las estaciones San Nicolás y San Bernabé.

Los instrumentos y unidades de medida que se usaron para realizar la medición de la dirección y velocidad del viento, la precipitación y las partículas suspendidas menores a  $10\mu m$  ( $PM_{10}$ ) están enlistados en la Tabla 3.

Parámetro	Instrumento	Unidad de medición
Dirección de viento	Metone 24A	Grados
Velocidad del viento	Metone 14A	Km/h
Precipitación	Metone 370	mm/hr
$PM_{10}$	BAM120	$\mu g/m^3$

Tabla 3: Instrumentos de medición instalados en las estaciones de monitoreo del SIMA

La información recabada en los instrumentos es monitoreada continuamente y resumida en promedios para cada hora. La calibración y mantenimiento está regida por los protocolos NOM-156-SEMARNAT-2012 [SEMARNAT, 2012] y NOM-172-SEMARNAT-2019 [SEMARNAT, 2019].

## 2.3. Satellite measurements

### 2.3.1. OMI-NASA Data

El Aerosol Optical Depth 500nm ( $AOD_{500}$ ) y la columna total de ozono (TOC) se obtuvieron del satélite OMI-NASA. Los productos utilizados fueron el OMAERUVd [Omar O. Torres, 2008] y OMDOAO3e [Pawan K. Bhartia, 2012] para el  $AOD_{500nm}$  y el TOC respectivamente. Se tomaron los valores diarios disponibles en el periodo 2015-2020.

### 2.3.2. MODIS-NASA Data

We download the data of Aerosol Optical Depth at 550 nm ( $AOD_{550nm}$ ) from NASA's satellite MODIS. The data is taken daily and with a spatial resolution of 1 Deg. We used the product MODIS-Aqua Aerosol Cloud Water Vapor Ozone Daily L3 Global 1Deg CMG (MYD08\_D3) and looked at two data sets: Deep Blue Combined Mean and Land and Ocean Mean. [Platnick, S., et al., 2015]

### 2.4. SMARTS Model

El *Simple Model of the Atmosphere Radiative Transfer of Sunshine* (SMARTS 2.9.5) es un modelo de transferencia radiativa escrito en el lenguaje *Fortran* [Gueymard, 1995], el cual calcula la irradiancia solar directa, difusa y la global en cualquier ángulo en la superficie de la Tierra. En la Tabla 4 se enlistan las diferentes condiciones de la troposfera en donde  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  son los exponentes de Ångström para las  $\lambda < 500nm$  y  $\lambda > 500nm$  respectivamente,  $SSA_{500}$  es el Single Scattering Albedo a 500 nm,  $g_{500}$  es el factor de asimetría a 500 nm. Los gases  $CH_2O$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $HNO_3$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $O_3$  y  $SO_2$  son valores de entrada que representan concentraciones adicionales al U.S. Standard Atmosphere a nivel del suelo en ppmv, para las condiciones pristine y SSA pristine los valores son inferiores a las condiciones estandar. [Gueymard, 1995]

Parameters	Stage			
	Pristine	Moderate	SSA Pristine	SSA Moderate
$\alpha_1$	0.8565	0.8565	1.0	1.0
$\alpha_2$	1.2037	1.2037	1.0	1.0
$SSA_{500}$	0.6536	0.6536	0.8	0.8
$g_{500}$	0.6783	0.6783	0.68	0.68
$CH_2O$	-0.003	0.007	-0.003	0.007
$CH_4$	0	0.3	0	0.3
$CO$	-0.1	0.35	-0.1	0.35
$HNO_3$	0	0.005	0	0.005
$NO$	0	0.2	0	0.2
$NO_2$	0	0.02	0	0.02
$O_3$	-0.007	0.053	-0.007	0.053
$SO_2$	0	0.05	0	0.05

Tabla 4: Parámetros atmosféricos para los diferentes escenarios usados en el modelo SMARTS.

#### 2.4.1. Algoritmo para determinar el AOD utilizando mediciones in situ

Se escribió un código en el lenguaje *Python*, el cual crea el archivo de input para el funcionamiento del modelo SMARTS. Utilizando la base de datos de días de cielo despejado que contiene el día, el mes y el año en formato yymmdd y la TOC correspondiente a las fechas clasificadas. El código escrito esta diseñado para ejecutar el modelo y obtener como resultado una matriz de espectros solares cada minuto entre las 9 y 16 horas. Posteriormente se calcula la irradiancia solar total con base

a la ecuación 1.

$$I(t) = \int_{285}^{2800} E(\lambda, t) d\lambda \quad (1)$$

A partir de la obtención de la irradiancia solar minuto a minuto en función de las horas del día, se establece el valor máximo de irradiancia solar y se calcula el promedio centrado en 1 hora. La diferencia relativa entre el promedio de la irradiancia solar máxima medida y la irradiancia solar obtenida con el modelo usando la ecuación 2.

$$RD = \left( \frac{Model - Measurement}{Measurement} \right) * 100 \% \quad (2)$$

Inicialmente el límite inferior y superior en la búsqueda del  $AOD_{500}$  está entre 0 y 1 respectivamente ( $AOD_i = 0, AOD_f = 1$ ), el AOD de cada iteración en la búsqueda se calcula de la siguiente manera:

$$AOD = \frac{AOD_i + AOD_f}{2}$$

Dependiendo del valor de la diferencia relativa (RD) se calcula un valor al AOD y de los límites de la búsqueda. El criterio para determinar el AOD se basa en los siguientes puntos:

1. Si  $RD > 11 \%$ , entonces el  $AOD_i$  de la nueva búsqueda es el  $AOD_i = AOD$ .
2. Si  $RD < 9 \%$ , entonces el  $AOD_f$  de la nueva búsqueda  $AOD_f = AOD$ .

Este proceso termina cuando se obtiene una diferencia relativa entre  $9 \%$  y  $11 \%$  y el valor de AOD se guarda en la base de datos de días de cielo despejado.

### 3. Results

### 4. Conclusion

### Referencias

- [Benítez-García et al., 2014] Benítez-García, S.-E., Kanda, I., Wakamatsu, S., Okazaki, Y., and Kawano, M. (2014). Analysis of criteria air pollutant trends in three mexican metropolitan areas. *Atmosphere*, 5(4):806–829.
- [Centro Mario Molina, 2019] Centro Mario Molina (2019). Análisis de la contaminación por  $pm_{2.5}$  en la ciudad de monterrey, nuevo león, enfocado a la identificación de medidas estratégicas de control.
- [González-Santiago et al., 2011] González-Santiago, O., Badillo-Castañeda, C. T., Kahl, J. D., Ramírez-Lara, E., and Balderas-Renteria, I. (2011). Temporal analysis of  $pm_{10}$  in metropolitan monterrey, méxico. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 61(5):573–579.



- [Gueymard, 1995] Gueymard, C. A. (1995). SMARTS2: a simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: algorithms and performance assessment. *Report No. FSEC-PF-270-95*, pages 1–84.
- [INECC, 2011] INECC (2011). El estado de la calidad del aire en México: 18 ciudades.
- [INECC, 2019] INECC (2019). Informe nacional de la calidad de aire México.
- [ITDP & ICM, 2019] ITDP & ICM (2019). Externalidades negativas asociadas al transporte terrestre.
- [Martínez-Cinco et al., 2016] Martínez-Cinco, M., Santos-Guzmán, J., and Mejía-Velázquez, G. (2016). Source apportionment of pm<sub>2.5</sub> for supporting control strategies in the monterrey metropolitan area, Mexico. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 66(6):631–642. PMID: 26950193.
- [Mukherjee and Agrawal, 2017] Mukherjee, A. and Agrawal, M. (2017). World air particulate matter: sources, distribution and health effects. *Environmental Chemistry Letters*, 15(2):283–309.
- [Omar O. Torres, 2008] Omar O. Torres (2008). Omi/aura near uv aerosol optical depth and single scattering albedo l3 1 day 1.0 degree x 1.0 degree v3. Accessed: 6 marzo 2020, [10.5067/Aura/OMI/DATA3003](https://dx.doi.org/10.5067/Aura/OMI/DATA3003).
- [Pawan K. Bhartia, 2012] Pawan K. Bhartia (2012). Omi/aura toms-like ozone and radiative cloud fraction l3 1 day 0.25 degree x 0.25 degree v3. Accessed: 6 marzo 2021, [10.5067/Aura/OMI/DATA3002](https://dx.doi.org/10.5067/Aura/OMI/DATA3002).
- [Platnick, S., et al., 2015] Platnick, S., et al. (2015). Modis atmosphere l3 daily product. [http://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MYD08\\_D3.061](https://dx.doi.org/10.5067/MODIS/MYD08_D3.061).
- [ProAire, 2012] ProAire (2018-2012). Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del Área metropolitana de monterrey 2008-2012.
- [ProAire Nuevo León, 2016] ProAire Nuevo León (2016). Programa de gestión para mejorar la calidad del aire del estado de nuevo león. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/250974/ProAire\\_Nuevo\\_Leon.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/250974/ProAire_Nuevo_Leon.pdf).
- [SEDATU, CONAPO & INEGI, 2015] SEDATU, CONAPO & INEGI (2015). Delimitación de las zonas metropolitanas de México.
- [SEMARNAT, 2012] SEMARNAT (2012). Norma oficial mexicana nom-156-semarnat-2012, establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire. Diario Oficial de la Federación: Mexico City, Mexico.
- [SEMARNAT, 2019] SEMARNAT (2019). Norma oficial mexicana nom-172-semarnat-2019, establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire. Diario Oficial de la Federación: Mexico City, Mexico.
- [SIMA, 2015] SIMA (2015). Sistema integral de monitoreo ambiental (sima) nuevo león. <http://aire.nl.gob.mx/>.



[SIMA, 2019] SIMA (2019). Estadística 2018 sobre calidad del aire en la zona metropolitana de Monterrey.

[von Schneidemesser et al., 2015] von Schneidemesser, E., Monks, P. S., Allan, J. D., Bruhwiler, L., Forster, P., Fowler, D., Lauer, A., Morgan, W. T., Paasonen, P., Righi, M., Sindelarova, K., and Sutton, M. A. (2015). Chemistry and the linkages between air quality and climate change. *Chemical Reviews*, 115(10):3856–3897. PMID: 25926133.