

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería



TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**Ingeniero en Geofísica**

**“Identificación y dispersión de SO<sub>2</sub> en México usando percepción remota satelital y modelos de trayectoria”**

que como requisito parcial para obtener el título de Ingeniero en Geofísica

**PRESENTA**

P. Cynthia Brisseida Hernández Velázquez

**DIRECTOR EXTERNO**

Dr. Marco Antonio Mora Ramírez

**DIRECTOR INTERNO**

M. en C. Julio César González Hernández

FECHA: 26 de agosto de 2021



**BUAP**

Oficio No. SAC/0917/2021

C. CYNTHIA BRISSEIDA HERNÁNDEZ VELÁZQUEZ  
PASANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA  
GEOFÍSICA  
Presente.

En atención al Tema de Tesis que puso Usted a consideración de la Coordinación de Área y de esta Secretaría Académica en coordinación con la Dirección de ésta Facultad de Ingeniería, dentro del marco de Titulación por Examen Profesional en línea, como medio de Titulación se dio revisión y se ha autorizado el tema denominado:

"IDENTIFICACIÓN Y DISPERSIÓN DE SOD EN MÉXICO USANDO PERCEPCIÓN REMOTA SATELITAL Y MODELOS DE TRAYECTORIA."

Por lo anterior hago de su conocimiento que se asigna como Asesor de tema al Dr. Marco Antonio Mora Ramírez y la Mtro. Julio César González Hernández como Co Asesor.

Sin más por el momento, le envío la seguridad de mi consideración más distinguida.

Atentamente

"Pensar bien, para vivir mejor"  
H. Puebla de Z. a 03 de mayo de 2021

M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora  
Director



M'ACGZ /barv  
C.c.p. Interesado  
C.c.p. Archivo

Facultad  
de Ingeniería

Bld. Valsequillo y Av. San Claudio  
s/n, edif. ING 4, Col. San Manuel,  
Ciudad Universitaria,  
Puebla, Pue. C.P. 72570  
222 229 55 00 Ext. 7610

**M. I. Angel Cecilio Guerrero Zamora**  
**Director de la Facultad de Ingeniería**  
**Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**

**Presente.**

El que suscribe Dr. Marco Antonio Mora Ramírez, director del tema de tesis:

**“IDENTIFICACIÓN Y DISPERSIÓN DE SO<sub>2</sub> EN MÉXICO USANDO PERCEPCIÓN REMOTA SATELITAL Y  
MODELOS DE TRAYECTORIA.”**

Presentada por la C. Cynthia Brisseida Hernández Velázquez, pasante del Colegio de Ingeniería Geofísica, y en atención al oficio No. SAC/0917/2021 con fecha de emisión 03 de mayo de 2021, me permito informar a Usted que después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, metodología, redacción y ortografía de la tesis correspondiente, no tengo inconveniente en autorizar la impresión de la misma.

**Atentamente**

**“Pensar bien, para vivir mejor”**

**H. Puebla de Z. a 15 de septiembre de 2021**



**Dr. Marco Antonio Mora Ramírez**  
**Director de tesis**

**M'MAMR/BARV**  
**C.c.p. Interesado**  
**C.c.p. Archivo**

## **DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS**

*A mis padres, Tereso y Gabina y a mis hermanos Daniel, Fabiola y Allizon, por darme la vida y enseñarme el valor de las cosas y las consecuencias de las decisiones; por ustedes es que estoy por concluir esta etapa tan maravillosa e importante, gracias por estar conmigo en cada paso que he dado. Todo lo que tengo y lo que soy es gracias a ustedes y la vida no me va a alcanzar para devolverles todo el amor, la comprensión y el apoyo que me han dado.*

*A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, mi Alma Mater, que en 2010 me dio la oportunidad de crecer académicamente y soñar en sus aulas de preparatoria, y en 2013 nuevamente me abrió las puertas de su casa en la Facultad de Ingeniería, no sólo para formarme como Ingeniero en Geofísica, también como un mejor ser humano, más sensible, más crítico, más empático, más objetivo y más honesto.*

*Agradezco infinitamente al Dr. Marco Antonio Mora, de la Facultad de Ciencias Químicas por permitirme trabajar en esta tesis, gracias por su paciencia, sus conocimientos compartidos, su comprensión durante este proceso.*

*A las personas que formaron parte de mi vida académica estos ocho años, M. C. Julio C. González, Dr. Fernando G. Ceballos, Dr. José Luis G. Guevara, M.C. Yleana Martínez Mirón, Dra. Laura A. Paniagua Solar, Ing. Isaac Garibo S., Dr. Nicolas Grijalva, Ing. Melesio Carbajal y al Ing. Manuel Uribe. Tienen todo mi respeto y admiración y gracias por compartir sus conocimientos con nosotros.*

*A mis compañeros y amigos del Colegio de Geofísica, Andy, Sara, Ruby, Karla, Jaque, Alejandro, Marco, Rafa, Oliver, Gustavo, Jacob, Alexa, Guchi, Toni y demás compañeros, deseo con todo mi corazón que todos cumplamos nuestros sueños y conservemos nuestros corazones salvajes siempre, gracias por estos años.*

*La palabra éxito, de procedencia latina «*exītus*», quiere decir salida. Después de ocho años, este trabajo es la salida hacia nuevos aprendizajes, crecimiento y evolución tanto profesional como personal y le agradezco a la vida, dios y al universo por haberme permitido llegar a ella.*

# TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN .....</b>	<b>6</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>7</b>
<b>1.1 ANTECEDENTES.....</b>	<b>7</b>
<b>1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>9</b>
1.2.1 JUSTIFICACIÓN.....	9
<b>1.3 OBJETIVO.....</b>	<b>10</b>
1.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
<b>1.4 LIMITACIONES .....</b>	<b>10</b>
<b>CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1 PERCEPCIÓN REMOTA .....</b>	<b>11</b>
2.1.1 RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA .....	12
2.1.2 FRIMAS ESPECTRALES .....	12
2.1.3 PLATAFORMAS .....	13
2.1.4 SENSORES.....	14
2.1.5 IMÁGENES SATELITALES .....	15
<b>2.1 COPERNICUS.....</b>	<b>16</b>
<b>2.3 MODELOS DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.....</b>	<b>17</b>
2.3.1 MODELO HYSPLIT .....	18
<b>2.4 FACTORES METEOROLÓGICOS QUE AFECTAN LA DISPERSIÓN DE LOS CONTAMINANTES.....</b>	<b>19</b>
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA .....</b>	<b>21</b>
<b>3.1. DATOS SATELITALES E IDENTIFICACIÓN DE FUENTES DE SO<sub>2</sub> .....</b>	<b>21</b>
<b>3.2 CONFIGURACIÓN DE HYSPLIT .....</b>	<b>21</b>
<b>3.3 CONCENTRACIONES AMBIENTALES DE SO<sub>2</sub> .....</b>	<b>22</b>
<b>3.4 CORRELACIÓN ENTRE LAS ZONAS DE INFLUENCIA Y MEDICIONES EN SUPERFICIE.....</b>	<b>22</b>

<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS .....</b>	<b>23</b>
<b>4.1 IDENTIFICACIÓN DE FUENTES DE SO<sub>2</sub> .....</b>	<b>23</b>
<b>4.2 TRAYECTORIAS ESTACIONALES DE SO<sub>2</sub>.....</b>	<b>27</b>
4.2.1 POZOS PETROLEROS DE PEMEX (CANTAREL Y ZAMA).....	28
4.2.2 PACÍFICO TAD LÁZARO CÁRDENAS PEMEX .....	29
4.2.3 REFINERÍA CADEREYTA, NUEVO LEÓN. ....	30
4.2.4 REFINERÍA FRANCISCO I MADERO, TAMAULIPAS. ....	31
4.2.5 REFINERÍA DE TULA.....	32
4.2.6 VOLCÁN POPOCATÉPETL .....	33
<b>4.3 CASOS DE ESPECIALES DE ESTUDIO .....</b>	<b>34</b>
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>39</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>41</b>
<b>ANEXO I .....</b>	<b>44</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<u>FIGURA 1 EJEMPLOS DE LAS TRES PRINCIPALES FUENTES DE EMISIONES DE SO<sub>2</sub> EN MÉXICO: (A) PLATAFORMAS EN EL GOFO DE MÉXICO, (B) REFINERÍA EN NUEVO LEÓN Y (C) EL VOLCÁN POPOCATÉPETL.</u> .....	9
<u>FIGURA 2 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE PERCEPCIÓN REMOTA.</u> .....	11
<u>FIGURA 3.ESPECTRO ELTROMAGNÉTICO</u> .....	12
<u>FIGURA 4. SECCIONES TRANSVERALES DE ABSORCIÓN PARA SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, BrO, HONO, IO, Y OC</u> .....	13
<u>FIGURA 5. MAPEO DE EMIISIONES DE SO<sub>2</sub> QUE REALIZA TROPOMI A NIVEL GLOBAL DE ACUERDO A LOS DATOS DE LA NASA.</u> .....	16
<u>FIGURA 6. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA EN ESTE TRABAJO</u> .....	21
<u>FIGURA 7. MUESTRA EL PROMEDIO ANUAL DE SO<sub>2</sub> CALCULADO A PARTIR DE LOS DATOS DE SENTINEL-5P...</u> 24	
<u>FIGURA 8. EMISIONES ANUALES DE SO<sub>2</sub> DESDE EL SATÉLITE OMI. (HTTPS://SO2.GSFC.NASA.GOV/)</u> .....	26
<u>FIGURA 9. EMISIONES ANUALES DE SO<sub>2</sub> DE LOS PRINCIPALES EMISORES EN MÉXICO DE 2005-2019</u> .....	27
<u>FIGURA 10. FRECUENCIAS MENSUALES DE TRAYECTORIAS DESDE EL SITIO DE POZOS PETROLEROS DE PEMEX EN EL GOLFO DE MÉXICO.</u> .....	28
<u>FIGURA 11. FRECUENCIA MENSUAL DE TRAYECTORIAS DE SO<sub>2</sub> EN (A) SEPTIEMBRE, (B) OCTUBRE Y (C) NOVIEMBRE.</u> .....	29
<u>FIGURA 12. FRECUENCIA MENSUAL DE TRAYECTORIAS DE SO<sub>2</sub> HACIA DELANTE DESDE EL SITIO DE LA REFINERÍA DE CADEREYTA, NUEVO LEÓN.</u> .....	30
<u>FIGURA 13. FRECUENCIA MENSUAL DE TRAYECTORIAS DE SO<sub>2</sub> HACIA DELANTE DESDE EL SITIO DE REFINERÍA FRANCISCO I. MADERO, EN CIUDAD MADERO, TAMAULIPAS.</u> .....	31
<u>FIGURA 14. FRECUENCIA MENSUAL DE TRAYECTORIAS DE SO<sub>2</sub> HACIA DELANTE DESDE EL SITIO DE REFINERÍA DE TULA, HIDALGO.</u> .....	32
<u>FIGURA 15. FRECUENCIA MENSUAL DE TRAYECTORIAS DE SO<sub>2</sub> HACIA DELANTE DESDE EL VOLCÁN POPOCATÉPETL</u> .....	33
<u>FIGURA 16. PROMEDIO MENSUAL (A) DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE POR SO<sub>2</sub> Y (B) DE LLUVIAS (AZUL) A PARTIR DE LOS SITIOS DE MONITOREO DE LA ZMVT</u> .....	34
<u>FIGURA 17. CONCENTRACIONES MENSUALES DE SO<sub>2</sub> EN LOS MESES DE (A) FEBRERO, (B) MARZO Y (C) ABRIL.</u> .....	35
<u>FIGURA 18. CONCENTRACIONES MENSUALES EN SEPTIEMBRE DE SENTINEL-9P</u> .....	37
<u>FIGURA 19. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE EMISIONES DE SO<sub>2</sub> ANIVEL MUNICIPAL Y SU CONTROBUCCIÓN PROCENTUAL POR TIPO DE FUENTE. FUENTE: TOMADO DEL INVENTARIO DE EMISIONES EN EL ESTADO DE MORELOS-2014</u> .....	38
<u>FIGURA 20. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS EMISIONES DE SO<sub>2</sub> POR FUENTES FIJAS. FUENTE: TOMADO DEL INVENTARIO DE EMISIONES EN EL ESTADO DE MORELOS-2014</u> .....	38
<u>FIGURA A1. MAPA DE FRECUENCIAS MENSUALES DE TRAYECTORIAS HACIA ATRÁS DESDE EL SITIO DE TOLUCA. MUESTRA QUE EL 70-80% DE LAS FRECUENCIAS DE TRAYECTORIAS PARTEN DEL SITIO DE LA REFINERÍA DE TULA. RETROTRAYECTORIA DESDE EL SITIO DE TOLUCA, MUESTRA QUE DE EL 70-80% DE LAS FRECUENCIAS DE TRAYECTORIAS HACIA ATRÁS PARTEN DEL SITIO DE LA REFINERÍA DE TULA.</u> .....	44

## ÍNDICE DE TABLAS

<u>TABLA 1. DETALLES DE LA NOM-022-SSA1-2010</u> .....	7
<u>TABLA 2. UBICACIÓN DE LAS FUENTES DE SO<sub>2</sub> POR ZONAS</u> .....	24

## RESUMEN

El dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) es un gas incoloro que tiene implicaciones negativas en la salud de las personas, impacto en diversos elementos de la biodiversidad e incluso en el deterioro de las edificaciones históricas. Por esta razón es fundamental conocer las concentraciones ambientales de este contaminante, identificar las fuentes que lo generan en el contexto de la meteorología presente. En este trabajo proponemos el uso de datos satelitales para localizar las principales fuentes de SO<sub>2</sub> en México. Empleamos el modelo de trayectoria HYSPLIT para caracterizar por estación climática la dispersión de este contaminante desde cada sitio con emisiones importantes de SO<sub>2</sub>. Buscamos correlacionar las concentraciones medidas en superficie con la dispersión de contaminantes desde las fuentes. Finalmente, se determinaron regiones de influencia de cada sitio con depósitos de SO<sub>2</sub> significativos.

**Palabras Clave:** Modelos de Trayectoria, SO<sub>2</sub>, Datos satelitales, HYSPLIT, Salud pública.

## ABSTRACT

Sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) is a colorless gas that negatively impacts people's health, impacts various biodiversity elements, and can deteriorate historic buildings. For this reason, it is essential to know the concentrations of this pollutant and identify the sources that generate it in the context of the present meteorology. In this thesis, we propose using satellite data to locate the primary sources of SO<sub>2</sub> in Mexico. We used the HYSPLIT trajectory model to characterize this pollutant's dispersion by weather station for each site with significant emissions of SO<sub>2</sub>. We tried to correlate the site measured surface concentrations with the dispersion of pollutants from the sources. Finally, regions with significant SO<sub>2</sub> deposits were determined.

**Keywords:** Backward trajectory, SO<sub>2</sub>, Satellite data, Hysplit, Public Health.

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 ANTECEDENTES

El dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) es un gas incoloro, irritante, con un olor penetrante que se comienza a percibir por algunas personas sensibles a partir de 0.3 a 1.4 ppm (partes por millón) y es perfectamente distinguible a partir de 3 ppm. El SO<sub>2</sub> tiene efectos en la salud de las personas y en la biodiversidad. La exposición a corto plazo al SO<sub>2</sub> puede dañar el sistema respiratorio y circulatorio [10,12]. Las personas con asma, y especialmente los niños y ancianos son los más sensibles a los efectos del SO<sub>2</sub>. La Tabla 1 muestra los valores de referencia por exposición a SO<sub>2</sub> con el fin de proteger la salud de las personas en México.

TABLA 1. DETALLES DE LA NOM-022-SSA1-2010

<b>Exposición</b>	<b>Valor de referencia</b>
1 hora	0.075 ppm (196.5 µg/m <sup>3</sup> ) como promedio aritmético de 3 años consecutivos de los percentiles 99 anuales, obtenidos de los máximos diarios
24 horas	0.04 ppm (104.8 µg/m <sup>3</sup> ) como el máximo de 3 años consecutivos, obtenidos de los promedios de 24 horas

Además de los efectos directos en salud el SO<sub>2</sub> es precursor de la formación de material particulado (PM, por sus siglas en inglés). Esto significa que las emisiones de SO<sub>2</sub> que ocasionan altas concentraciones de SO<sub>2</sub> en el aire, a su vez, conducen a la formación de otros óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>). Los SO<sub>x</sub> pueden reaccionar químicamente con otros compuestos en la atmosfera para formar pequeñas partículas (PM). Las partículas tienen el potencial de penetrar profundamente en los pulmones y el torrente sanguíneo ocasionando problemas de salud [3,24,25].

El SO<sub>2</sub> que se encuentra en la atmosfera puede ser removido por efectos mecánicos del viento - depósito seco. Así mismo, la lluvia es otro mecanismo que remueve este contaminante de la atmosfera y se conoce como depósito húmedo. Cuando el SO<sub>2</sub> y los

óxidos de nitrógeno (NOx) reaccionan en presencia de agua y otras especies químicas pueden formar ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). El ácido sulfúrico puede caer a la superficie de la tierra mediante depósito húmedo, produciéndose así el llamado fenómeno de la lluvia ácida con implicaciones sobre los bosques [25,6], edificios [26,1], suelos [16], y elementos de la biodiversidad [9].

La vida media del SO<sub>2</sub> en la atmósfera es de unos 2 a 4 días, y casi la mitad de las emisiones vuelven a depositarse en la superficie. Es una sustancia reductora, que con el tiempo y en contacto con el aire y la humedad, se convierte en trióxido de azufre. Es soluble en agua, formando una disolución ácida, y aún, siendo inestable en estas condiciones, es capaz de formar sales como los sulfitos y bisulfitos. Su tasa de oxidación depende de varios parámetros, estos incluyen la presencia de fase acuosa en forma de nubes y neblina la concentración de oxidantes como H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, y O<sub>3</sub> y la intensidad de la luz solar [15].

Ahora bien, el SO<sub>2</sub> ingresa a la atmósfera terrestre a través de procesos naturales y antropogénicos. Desempeña un papel en la química a escala local y global y su impacto va desde la contaminación a corto plazo hasta los efectos sobre el clima. Las principales fuentes antropogénicas puntuales son las refinerías, fundidoras de metales, termoeléctricas y plataformas petroleras. Así mismo las fuentes móviles generan SO<sub>2</sub> en cantidades nada despreciables. Dentro de este sector tenemos las emisiones de barcos, estos consumen grandes cantidades de combustible con alto contenido en azufre, al igual que los aviones y algunos elementos del transporte de carga terrestre. Los puntos críticos de emisiones de SO<sub>2</sub> más grandes en el mundo se encuentran en Rusia, Sudáfrica, Irán, Arabia Saudita, India, China, México, Emiratos Árabes, Turquía y Serbia. India es el país que tiene el punto de mayor emisión en el mundo, contribuyendo al 15% global de emisiones puntuales, solo por arriba de Rusia y China [27]. Las emisiones antropogénicas contribuyen al 70% del SO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera, el resto es de origen natural y corresponde a las emisiones volcánicas e incendios en mucho menor proporción. Es importante enfatizar que México, además de las refinerías y la actividad petrolera tiene emisiones volcánicas en la zona centro del territorio. La figura 1 muestra ejemplos de las principales fuentes de SO<sub>2</sub> en el territorio mexicano.



(a) Plataformas Golfo-México



(b) Refinería en N.L.



(c) Volcán Popocatépetl

**FIGURA 1. EJEMPLOS DE LAS TRES PRINCIPALES FUENTES DE EMISIONES DE SO<sub>2</sub> EN MÉXICO: (A) PLATAFORMAS EN EL GOFO DE MÉXICO, (B) REFINERÍA EN NUEVO LEÓN Y (C) EL VOLCÁN POPOCATÉPETL.**

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para conocer las concentraciones ambientales de SO<sub>2</sub> y prevenir sus potenciales impactos en salud y la biodiversidad, es necesario hacer mediciones de las concentraciones ambientales o tener un registro de las emisiones que generan las fuentes antropogénicas. México es de los pocos países en el mundo que realiza monitoreo de calidad del aire desde hace muchos años, sin embargo, esta red de monitoreo es insuficiente para determinar los niveles de concentraciones de contaminantes a nivel nacional. Otro mecanismo que se tiene en México para proteger el ambiente y la salud de las personas es la declaración de las emisiones mediante la cédula de operación anual (COA). Este instrumento permite recolectar información sobre las emisiones y transferencias de contaminantes al aire, suelos, etc., que los establecimientos e industria tienen que reportar anualmente. De igual modo, este instrumento no es suficiente para tener una imagen detallada de cómo actúan los contaminantes en nuestro país.

### 1.2.1 JUSTIFICACIÓN

Recientemente, han surgido productos satelitales gratuitos que nos permiten tener una idea de las emisiones de SO<sub>2</sub>. Estas mediciones son prometedoras, por su disponibilidad temporal y su cada vez mejor resolución espacial. Este tipo de mediciones, en las cuales, se obtiene información de un objeto sin tener contacto físico con él, se denominan de percepción remota, ya que para lograrlas se requiere hacer mediciones desde el espacio con sensores a bordo de los satélites.

Bajo este contexto, es necesario contar con mediciones complementarias, que combinadas con modelos de trayectoria ayuden a prevenir posibles impactos de las emisiones de SO<sub>2</sub> en salud y la biodiversidad de México, incluyendo el impacto, positivo y negativo en los rendimientos de cultivos.

La observación de las emisiones de SO<sub>2</sub> desde el espacio es importante para determinar la ubicación de las principales fuentes emisoras de SO<sub>2</sub>, y en combinación con un modelo de trayectoria permite estudiar las zonas potenciales de impacto de dichas emisiones. Los resultados de esta investigación son de utilidad para complementar tanto las mediciones en superficie de la red de monitoreo SINAICA como para motivar estudios futuros sobre el impacto en los rendimientos de cultivos y elementos de la biodiversidad.

### 1.3 OBJETIVO

Identificar los sitios en México con emisiones significativas de SO<sub>2</sub> mediante el análisis de datos satelitales y determinación de las tendencias de las trayectorias, desde cada fuente de este contaminante, para determinar zonas de altas concentraciones de azufre y su origen y destino.

#### 1.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Localizar los sitios con emisiones de SO<sub>2</sub>, usando datos satelitales, para identificar las principales fuentes en México.
- b) Determinar las frecuencias mensuales de trayectorias desde cada sitio de emisión, empleando el modelo HYSPLIT, para conocer la tendencia de trayectorias de cada fuente.
- c) Estudiar casos específicos de zonas con altas concentraciones de SO<sub>2</sub>, para describir si los cambios observados en las concentraciones ambientales de SO<sub>2</sub> son debido a alguna de las fuentes consideradas en este análisis.

### 1.4 LIMITACIONES

Las mediciones satelitales tienen limitaciones en la resolución espacial, esto nos limita a estudiar como máximo a nivel municipal. La precisión de los datos está comprometida con diversos factores que varían con las estaciones climáticas. Los datos satelitales deben considerar el factor de nubosidad (Cloud Cover). Los datos de concentraciones de SO<sub>2</sub> en superficie (SINAICA) no siempre están disponibles para todas las estaciones con que cuenta a red. Esto limita la posibilidad de estudiar la correlación de las trayectorias de las plumas de SO<sub>2</sub> desde las fuentes y el impacto en ciertas regiones sin datos de concentraciones de SO<sub>2</sub>.

## CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 PERCEPCIÓN REMOTA

La percepción remota puede definirse como la adquisición de información de un objeto sin estar en contacto físico con él. Dicha información, se adquiere detectando y midiendo cambios que el objeto induce en su entorno, estos cambios pueden referirse a un campo electromagnético emitido o reflejado, ondas acústicas reflejadas o alteradas, o bien, a perturbaciones del campo gravitatorio o potencial magnético debido a la influencia del objeto. Para fines de esta investigación, nos limitaremos en específico a las técnicas electromagnéticas de adquisición de información. [12]

Los elementos que forman un sistema de percepción remota son los siguientes:

- Fuente de radiación electromagnética
- Interacción de las ondas electromagnéticas con la superficie/atmósfera.
- Receptores de ondas electromagnéticas.
- Tratamiento de imágenes.
- Usuario

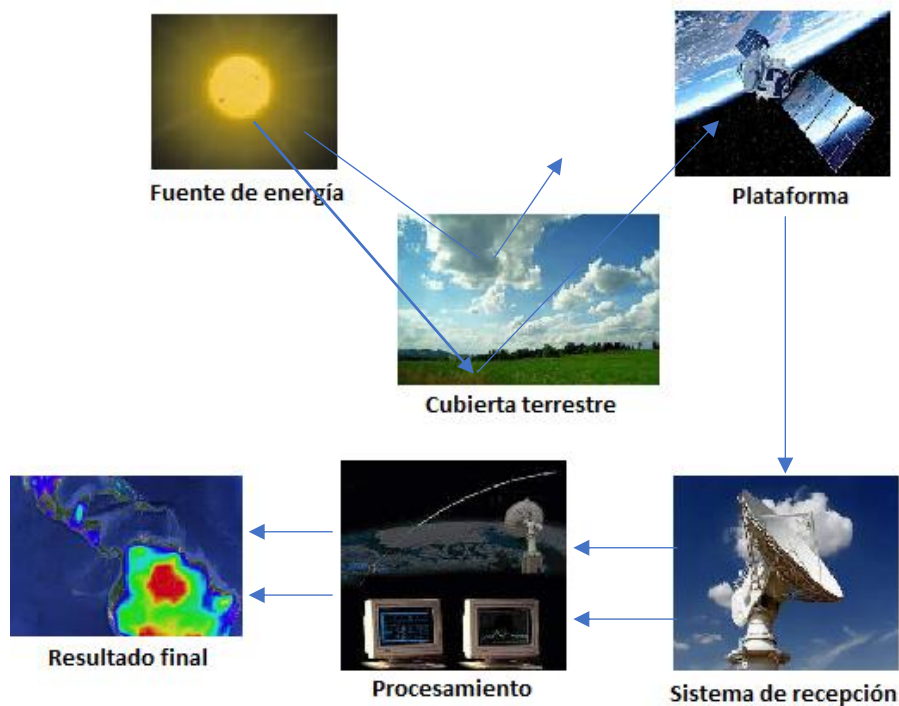


FIGURA 2. ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE PERCEPCIÓN REMOTA

### 2.1.1 RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA

Para comprender el concepto de percepción remota es necesario conocer la forma en la que la radiación interactúa con la superficie de la tierra. La principal fuente de energía del planeta que se presenta es el sol, dicha energía puede ser transferida de tres formas: conducción, convección y radiación

La radiación electromagnética se presenta como una distribución continua de longitudes de onda y frecuencias, desde las longitudes de onda cortas y altas frecuencias de las ondas cósmicas, hasta las largas longitudes de onda y bajas frecuencias de las ondas de radio, este rango de frecuencias se denomina espectro electromagnético. [12]

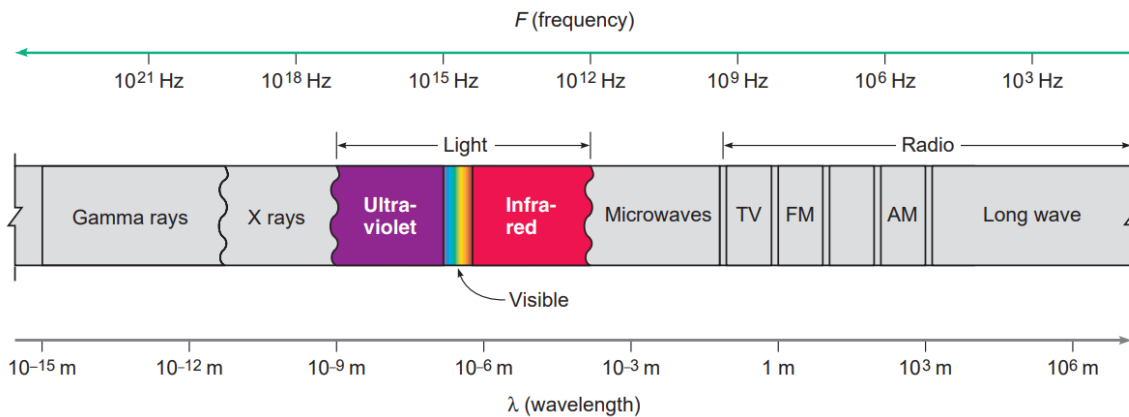


FIGURA 3. ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO. GRIFFITH, T. (2009)

El espectro electromagnético va desde los rayos gamma (longitudes de onda cortas, frecuencias altas), los rayos X, la luz ultravioleta, luz visible (a la que el ojo humano es sensible y se compone de las bandas rojo, verde y azul), los rayos infrarrojos, las microondas y radiofrecuencia (longitudes de onda largas, frecuencias cortas). Algunos de los sensores registran radiación electromagnética en el intervalo del visible (como las cámaras digitales), el infrarrojo (cercano infrarrojo y térmico), mientras que otros registran microondas, como los radares. [12]

### 2.1.2 FRIMAS ESPECTRALES

Los gases presentes en la atmosfera, como toda materia presente en el universo, interactúa con la radiación, absorbiéndola, reflejándola o transmitiéndola. Una vez que la

radiación solar ha traspasado a la atmósfera, interactúa ahora con la superficie terrestre, encontrándose con todo tipo de materiales, aguas dulces, saldas, tierra, nieve, zonas de vegetación, ciudades, etc. Cada tipo de superficie interactúa con la radiación de manera diferente, absorbiendo longitudes de onda específicas y reflejando de igual forma otras longitudes de onda. Esta característica hace posible la identificación de objetos, de acuerdo con la necesidad que se tenga, como vegetación, aguas, etc. Esto es posible, ya que se previamente se han realizado experimentos que han ayudado a caracterizar el comportamiento de las distintas superficies al recibir radiación y cuantificando los porcentajes de reflexión, absorción y transmisión. A este comportamiento específico que tiene cada objeto en el universo se le conoce como firma espectral.

En lo referente a la absorción, cada molécula determinada absorbe radiación en ciertas longitudes de onda concretas, dependiendo de su composición, en el caso del  $SO_2$  y otros gases, su rango de absorción se presenta a continuación. [14]

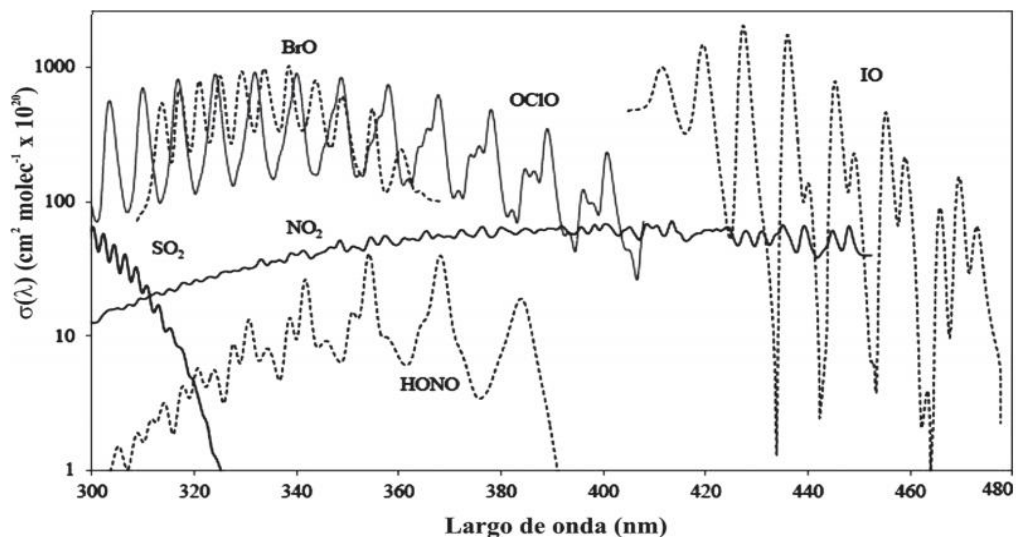


FIGURA 4. SECCIONES TRANSVERSALES DE ABSORCIÓN ( $\Sigma$ ) EN EL UV Y VISIBLE PARA LOS SIGUIENTES GASES:  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $BrO$ ,  $HONO$ ,  $IO$ , Y  $OCl$ . RODRÍGUEZ, K. (2015)

### 2.1.3 PLATAFORMAS

Los satélites (plataformas) tienen la función de captar la energía electromagnética, por medio de sensores que van montados sobre estos. Estas plataformas, están orientadas de acuerdo con su capacidad y altitud, orientación y rotación con relación al globo.

Los satélites con grandes altitudes suelen tener orbitas geoestacionarias, es decir, giran a velocidades que coinciden con la rotación de la Tierra, de esta forma parecen estacionarios. Con alturas de aproximadamente 3600 km, tienen la ventaja de poder observar y recoger información de forma continua sobre áreas específicas.

Gracias a su altitud, son capaces de monitorear el clima y los patrones de nubes que cubre todo un hemisferio de la tierra, de modo que, a medida que el satélite gira alrededor del planeta, el sensor “mira” y registra esa porción de superficie terrestre generando así un barrido de la zona. [18]

#### 2.1.4 SENSORES

Los sensores son los instrumentos que miden la radiación electromagnética. Existen diferentes tipos de sensores, que pueden ser agrupados en:

- Sensores activos: Estos sensores tienen su propia fuente de radiación. Esta fuente puede ocasionar que el objeto de estudio emita radiación o hacer que se refleje la radiación producida por el sensor. Los sensores activos son normalmente transportados en aviones y satélites denominados radar de imagen y sin imagen.
  - i. Radar de imagen. Representa las características de retro- dispersión de la superficie terrestre en forma de un mapa de faja o fotografía de determinada zona.
  - ii. Radar sin imagen. También llamado difusómetro, mide las propiedades de dispersión de la región y objetos observados.
- Sensores pasivos: Se denominan radiómetros y detectan las longitudes de onda que van de los rayos ultravioleta a las microondas. Sus dos características importantes son:
  - i. Campo de vista instantáneo. Ángulo en el que el detector es sensible a la radiación. Determina el tamaño del pixel que da la resolución espacial de la imagen final.
  - ii. Anchura de barrido. Distancia lineal en tierra que va rastreando el barredor. [12]

### 2.1.5 IMÁGENES SATELITALES

Las imágenes satelitales son matrices de celdas llamadas píxeles, formadas por número de filas y columnas. Cada una de estas representa un área geográfica indivisible, determinando así, el detalle espacial mínimo que se puede distinguir dentro de la imagen. El tamaño de la superficie que puede ser representada (pixel) varía dependiendo del satélite y del tamaño del sensor que tome la imagen.

Las principales características de las imágenes satelitales se describen a continuación:

**Resolución espacial.** Ésta corresponde al área sobre la Tierra que cubre cada pixel de la imagen. Por ejemplo, las imágenes obtenidas con los satélites GOES de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos tienen una resolución espacial de un kilómetro cuadrado. Con imágenes de esta resolución espacial es posible analizar el clima a nivel regional, por ejemplo, en todo México.

**Resolución espectral.** Se refiere a la región y ancho de banda del espectro electromagnético que pueden registrar, ya que ellas determinan la resolución espectral de la imagen, estas pueden ser de tipo pancromática, que tiene aplicación a la localización de áreas con relieve, topografía etc. Y a áreas con infraestructuras como carreteras, edificios y/o asentamientos humanos, entre otros. De igual modo, están las imágenes con resolución hiper y multiespectral, que son aplicables a la elaboración de mapas temáticos, la identificación de uso de suelos etc.

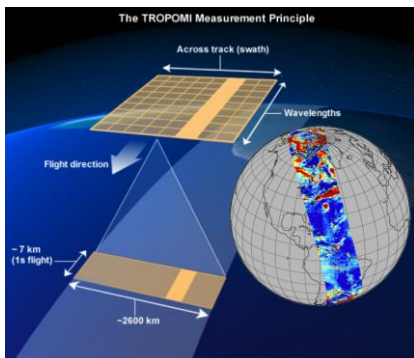
**Resolución temporal.** Cada determinado tiempo podemos obtener una imagen del mismo lugar con el mismo satélite, esto nos define la resolución temporal de la imagen satelital. La periodicidad con la que se pueden obtener las imágenes es una característica relevante, ya que de este periodo de tiempo depende la capacidad que tendremos para detectar cambios en esa región. Estos cambios sirven para identificar zonas deforestadas, la evolución de una inundación y el progreso de un cultivo, entre otras.

**Resolución radiométrica.** En una imagen satelital, la señal registrada por cada pixel de cada banda representa un valor de la luz reflejada por el área del objeto que cubre. La

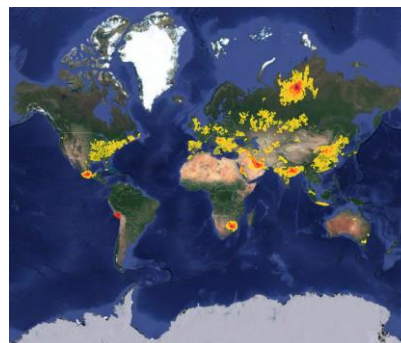
cantidad de valores diferentes para representar un pixel de la imagen nos define la resolución radiométrica de la imagen. [18]

## 2.1 COPERNICUS

El Programa *Copernicus*, es un proyecto iniciado en 2014, bajo la coordinación de la Unión Europea y la Agencia Espacial Europea. Tiene como objetivo la observación de la tierra a través de instrumentos a bordo de satélites, que generan datos globales para proveer de información de acceso gratuito y en tiempo casi real con la intención de poner a disposición del público información para satisfacer necesidades locales y regionales, además de gestionar de manera sustentable sus recursos. El programa *Copernicus* cuenta con un conjunto de satélites que responden a una necesidad específica, a saber, el cambio climático, monitoreo marítimo, monitoreo atmosférico. [8] El sentinel-5 precursor (sentinel-5p) es la primera misión dedicada al monitoreo atmosférico, planeada para operar por 7 años. Consiste en un satélite que mapea todo el globo terrestre cada 24h con un instrumento TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument) para monitorear la troposfera [26,13]. La Figura 2(a) muestra de manera esquemática como TRPOMI mapea la tierra en cada una de las orbitas alrededor de la tierra. TROPOMI proporciona datos de alta resolución espacial (1 x 1 km) y temporal, sobre ozono, metano, radiación UV y concentraciones columnares de SO<sub>2</sub>. Los datos que este instrumento provee sirven para determinar las principales fuentes de SO<sub>2</sub>. En la figura 2(b) muestra un ejemplo de las emisiones de SO<sub>2</sub> (sentinel-5p) globales. Se logran apreciar puntos de emisiones de SO<sub>2</sub> en China, Rusia, India, la parte este de Estados Unidos, y la zona centro de México.



(A)



(B)

## 2.3 MODELOS DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.

El objetivo de los modelos de calidad del aire es encontrar una relación entre las sustancias que son emitidas a la atmósfera, ya sea por causas naturales o antropogénicas, y las concentraciones de estas sustancias, u otras que se originan a partir de ellas, en la atmosfera. Un modelo bien calibrado y suficientemente validado puede representar adecuadamente la realidad, su dinámica y sus respuestas a diferentes perturbaciones en el futuro.

Estos modelos pueden ser de tipo físico, donde se busca representar global o parcialmente algún fenómeno a través de experimentos que se realizan en laboratorios. También se encuentran los modelos matemáticos, que son una serie de ecuaciones que describen los aspectos físicos y químicos de fenómenos atmosféricos.

Dentro de los modelos matemáticos encontramos a los que están basados en análisis estadístico, y los que se basan en la descripción de los procesos físicos y químicos, como los modelos de dispersión, que tratan de representar distintos procesos que afectan la evolución de los contaminantes en la atmosfera, tales como el transporte por el viento de los contaminantes (advección), la difusión y los procesos de depósito, entre otros.

Las aproximaciones numéricas para la solución de la ecuación de dispersión de contaminantes están basadas en los modelos de diferencias finitas, donde encontramos a la aproximación Euleriana y a la aproximación Lagrangiana.

- Aproximación Euleriana. Implica la simulación de los cambios de concentración de los contaminantes sobre una malla espacial fija basándose en la solución numérica explícita de la ecuación de conservación de la masa, resuelta en función de condiciones iniciales y de frontera adecuadas. Esto permite tratar directamente procesos no- lineales, como la química atmosférica. Esta aproximación se aplica cuando se consideran escenarios de emisiones complejos, que requieren soluciones en absoluto.
- Aproximación Lagrangiana. Es más apropiada para el tratamiento de emisiones de fuentes individuales puntuales, pudiendo seguir su desplazamiento y trayectoria.

Se aplican cuando las emisiones de fuente de un solo punto restringen cálculos a unos pocos puntos de la malla.

Gracias a estos métodos se ha podido crear una vasta gama de modelos atmosféricos que han permitido simular de forma exitosa los diferentes fenómenos atmosféricos. Como ejemplos de modelos Eulerianos tenemos ARIAS, CHIMERE, por mencionar algunos; para los modelos Lagrangianos tenemos DIPCOT, FLEXPART, entre otros. [17,23]

Sin embargo, también existen modelos que utilizan una combinación de ambos métodos como lo es HYSPLIT, en el cual, el método de cálculo es una combinación entre los enfoques euleriano y lagrangiano. Donde, los cálculos de advección y difusión se realizan en un marco lagrangiano, mientras que las concentraciones se calculan en un mallado. Dentro del enfoque lagrangiano, la dispersión se calcula siguiendo a la partícula, es decir, la advección de una partícula se calcula independientemente del cálculo de la dispersión. La integración de advección temporal de una partícula puede verse como una trayectoria simple que solo necesita el campo de velocidad tridimensional para su cálculo. [4]

### 2.3.1 MODELO HYSPLIT

Es importante analizar el comportamiento de las emisiones y su destino, derivado de las corrientes de aire, utilizando herramientas que permiten conocer la trayectoria del aire por días, meses e inclusive su comportamiento a lo largo de un año. La dispersión del  $\text{SO}_2$  desde su fuente puede ser simulada mediante modelos numéricos. El modelo lagrangiano de dispersión de partículas Hybrid Single Particle Lagrangian Model (HYSPLIT) [4] está diseñado para calcular la trayectoria, dispersión y depósito de largo alcance y mesoescala de contaminantes del aire a partir de fuentes puntuales, como las emisiones de las refinerías, o las fundidoras de metales que contribuyen a las emisiones de  $\text{SO}_2$ . Este modelo nos permite calcular las trayectorias hacia delante que sigue un elemento de volumen de aire, más comúnmente llamados parcelas de aire o paquetes de aire [20,23]. Para ello HYSPLIT incorpora las coordenadas de las fuentes y la meteorología para inicializar las ecuaciones de transporte [5]. Una *trayectoria de parcela de aire*, equivale a una estimación del movimiento de la parcela de aire en el tiempo y en el espacio. HYSPLIT nos permite conocer las trayectorias hacia delante, es decir estudiar el

movimiento de la parcela de aire desde el punto de estudio. Una trayectoria puede definirse por medio de una ecuación diferencial

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \mathbf{v}[\mathbf{r}(t)], \quad (1)$$

donde  $\mathbf{r}(t)$  es el vector de posición al tiempo  $t$  y  $\mathbf{v}$  es el campo de velocidad. Asumiendo un flujo bidimensional, [20], sugiere la siguiente solución numérica:

$$x_1 = x_0 + \Delta t u(x_0, y_0, t) \quad (2)$$

$$y_1 = y_0 + \Delta t v(x_0, y_0, t) \quad (3)$$

$$x_n = x_0 + 0.5 \Delta t [u(x_0, y_0, t) + u(x_{n-1}, y_{n-1}, t + \Delta t)] \quad (4)$$

$$y_n = y_0 + 0.5 \Delta t [v(x_0, y_0, t) + v(x_{n-1}, y_{n-1}, t + \Delta t)] \quad (5)$$

donde  $(x_0, y_0)$  son las coordenadas de la posición inicial al tiempo  $t$ , mientras que  $x_n$  y  $y_n$  se refieren a la  $n$ -ésima iteración de la posición para el tiempo  $t + \Delta t$ . Con este modelo, ec. (2), se pueden calcular estas trayectorias cada determinado tiempo, y después hacer promedios. La opción de *frecuencia de trayectoria* del modelo HYSPLIT iniciará una trayectoria desde una única ubicación y altura cada 6 horas y luego sumará la frecuencia con la que la trayectoria pasó sobre una celda de la cuadrícula y posteriormente se normalizará por el número total de trayectorias o puntos finales. Una trayectoria puede cruzar una celda de la cuadrícula una o varias veces. Por último, es importante mencionar que ya que el transporte de  $\text{SO}_2$  depende de la meteorología, pueden existir casos donde las trayectorias sean de largo alcance - intercontinental [22].

## 2.4 FACTORES METEOROLÓGICOS QUE AFECTAN LA DISPERSIÓN DE LOS CONTAMINANTES.

Si el gas contaminante de una fuente sale a una temperatura mayor a la del aire circundante, a 1km de altura, la temperatura del gas descenderá  $10^\circ\text{C}$  debido al gradiente adiabático seco. Si la temperatura del aire circundante sigue siendo menor, el gas seguirá ascendiendo y dispersándose lejos de la fuente según la dirección del viento, perdiendo temperatura hasta que se equilibre con la del aire circundante. Debido a la diferencia de densidades que genera convección, la pequeña variación de temperatura hace que el gas ascienda. En condiciones de saturación de humedad relativa y debido al calor latente, la

temperatura del gas sólo descenderá 5°C debido al gradiente adiabático húmedo, si la temperatura del aire circundante es mayor, el gas descenderá nuevamente a la superficie debido a la precipitación y a que será demasiado denso para seguir subiendo, sin la existencia de los eventos de convección, por lo que las condiciones de la atmosfera serán estables y el gas contaminante no se dispersará y se quedará en las zonas cercanas a la fuente. [21]

En la troposfera baja la temperatura del aire disminuye con la altura, sin embargo, si la temperatura de una masa de aire en la superficie del suelo es inferior a la temperatura del aire a determinada altura, esa masa de aire de la superficie no va a poder ascender porque la masa de aire más caliente que esta sobre ella va a actuar como tapadera, a este proceso se le llama inversión térmica. En épocas de secas frías se presenta este proceso debido a que los días son más cortos y por lo tanto toda la poca radiación absorbida durante el día se va evaporando durante la noche, cuando la temperatura disminuye y la humedad relativa aumenta, de modo que, al amanecer, las masas de aire en la superficie tendrán menos temperatura que las de más arriba. En épocas de secas calientes, la saturación de humedad es baja, lo que habilita una mayor cantidad de su acumulación debido a las altas temperaturas. Cuando la radiación solar llega a la tierra provoca que las moléculas de H<sub>2</sub>O que se encuentran en estado líquido, se desprendan y salgan a la atmosfera formando vapor de agua disminuyendo la temperatura en la superficie, cuando la temperatura desciende y las masas de aire están llegando a una saturación de humedad considerable, estas moléculas de vapor de agua pierden velocidad y chocan con los núcleos de condensación, formando así las precipitaciones. [21]

## CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

La figura 3 muestra de manera esquemática la metodología. En las siguientes subsecciones se describen con cierto detalle las etapas de esta metodología.

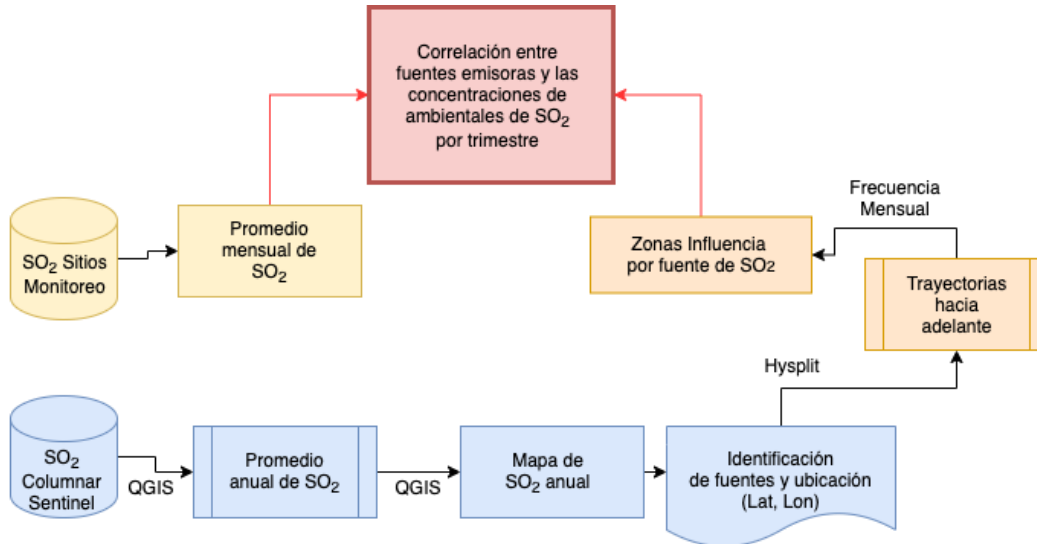


FIGURA 6. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA EN ESTE TRABAJO

### 3.1. DATOS SATELITALES E IDENTIFICACIÓN DE FUENTES DE SO<sub>2</sub>

Colectamos los datos columnares de SO<sub>2</sub> (mol m<sup>-2</sup>) a partir de sentinel-5p para el año base 2018. Los datos mensuales se descargaron desde el sitio (<https://www.sentinel-hub.com/>) y después se calculó el promedio anual empleando herramientas incluidas en la paquetería de QGIS (<https://qgis.org/es/site/>). Las concentraciones columnares de SO<sub>2</sub> se representan en un mapa de la República Mexicana para identificar los puntos espaciales donde existen contribuciones importantes de emisiones de SO<sub>2</sub> a la atmosfera, posteriormente se procede a la georreferenciación de estos sitios, es decir se buscarán sus coordenadas de latitud y longitud.

### 3.2 CONFIGURACIÓN DE HYSPLIT

Con base en las coordenadas de los puntos de emisión de SO<sub>2</sub> identificados en el paso anterior, ahora proponemos estudiar la dispersión del SO<sub>2</sub> desde cada uno de los sitios de emisiones empleando el modelo de trayectoria HYSPLIT. El modelo considera datos de meteorología de Global Data Assimilation System (GDAS; <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/>), con el propósito de inicializar la ejecución de la simulación. El modelo se configuro para considerar la capa en la vertical a 100 m sobre el

nivel de la superficie. Se calcula la trayectoria hacia delante que sigue una parcela de aire que inicia desde el sitio de emisión y se le sigue en su trayectoria por 72h (3 días), a su vez, cada seis horas se genera un nuevo cálculo o trayectoria hasta completar un mes. Las trayectorias en un mes se promedian, considerando la siguiente formula:

$$f = \frac{100 * T_c}{T} \quad (6)$$

donde  $f$  representa la frecuencia de trayectorias,  $T_c$  el número de trayectorias en cada celda y  $T$  el número total de trayectorias. Este parámetro nos proporciona una idea clara de las frecuencias dominantes en periodo de simulación. La resolución espacial de cada celda es  $1^\circ \times 1^\circ$ , y se selecciona un intervalo de reinicio de lanzamiento de trayectoria de 6h, y cada parcela se lanza desde una altura de 100 m sobre el nivel de la superficie.

### 3.3 CONCENTRACIONES AMBIENTALES DE SO<sub>2</sub>

Después de realizar el análisis de las trayectorias para el SO<sub>2</sub>, podemos intentar identificar zonas de influencia de este contaminante y al mismo tiempo tratar de correlacionar con las mediciones en superficie. Por esta razón colectamos datos horarios de concentraciones de SO<sub>2</sub> a partir de diversos repositorios de los Estados de la República disponibles en SINAICA. Primero, revisamos la suficiencia de datos y realizamos promedios mensuales de las concentraciones de SO<sub>2</sub> de cada sitio de monitoreo en superficie.

### 3.4 CORRELACIÓN ENTRE LAS ZONAS DE INFLUENCIA Y MEDICIONES EN SUPERFICIE.

Finalmente buscamos explorar una posible vinculación entre las concentraciones mensuales de SO<sub>2</sub> observadas en sitios de monitoreo y las zonas de influencia de los emisores. En otras palabras, cualitativamente describimos si los cambios observados en las concentraciones ambientales de SO<sub>2</sub> se explican de alguna manera debido a alguna de las fuentes que consideramos en este análisis.

## CAPÍTULO 4. RESULTADOS

### 4.1 IDENTIFICACIÓN DE FUENTES DE SO<sub>2</sub>

La figura 4 muestra el promedio anual de SO<sub>2</sub> columnar calculado a partir de los datos de sentinel-5p. Las emisiones que generan fuentes antropogénicas puntuales, como las refinerías se pueden apreciar desde el espacio. Primero, las principales fuentes de emisiones de SO<sub>2</sub> en el territorio colindante con el Océano Pacífico son: TAD Manzanillo (Colima), TAD Lázaro Cárdenas (Michoacán), central carboeléctrica Petacalco (Guerrero) y la Refinería “Ing. Antonio Dovalí Jaime” (Chiapas). En la zona centro del país podemos apreciar las concentraciones mayores y un área importante que afecta a la CDMX, Estado de México, Hidalgo y partes de Puebla, Tlaxcala, Morelos, estos forman lo que se conoce como la Megalópolis central de México. En esta región las diversas industrias, y las emisiones de las muy diversas actividades humanas, pero en particular la refinería de Tula (Hidalgo) y las emisiones del Volcán Popocatepetl, ubicado en los límites de Puebla, Morelos y el Estado de México (EdoMex), explican la presencia de estas altas concentraciones de SO<sub>2</sub> observadas desde el espacio. La zona del sureste es una zona dedicada a la actividad petrolera, donde se ubican complejos de PEMEX (Tabasco), pozos petroleros en aguas someras y profundas (ZAMA, Quesqui, entre otras) y la refinería de Dos Bocas (Tabasco) que se pueden apreciar tienen emisiones muy importantes de SO<sub>2</sub> a la atmósfera. En específico, las plataformas de extracción de PEMEX como la zona de Cantarell es una de las fuentes de emisión más importante a nivel global. Siguiendo con las emisiones cercanas al Golfo de México, pero en la zona norte, tenemos la Refinería de Poza Rica (Veracruz) y la refinería Francisco y Madera (Tamaulipas). En la zona noreste del territorio encontramos la refinería Peñoles (Coahuila), la refinería de Cadereyta N. L. (Monterrey), refinación TAR en Monclova (Coahuila) y la más importante de esta zona la Central termoeléctrica Carbón II junto con PEMEX refinación Monclova.

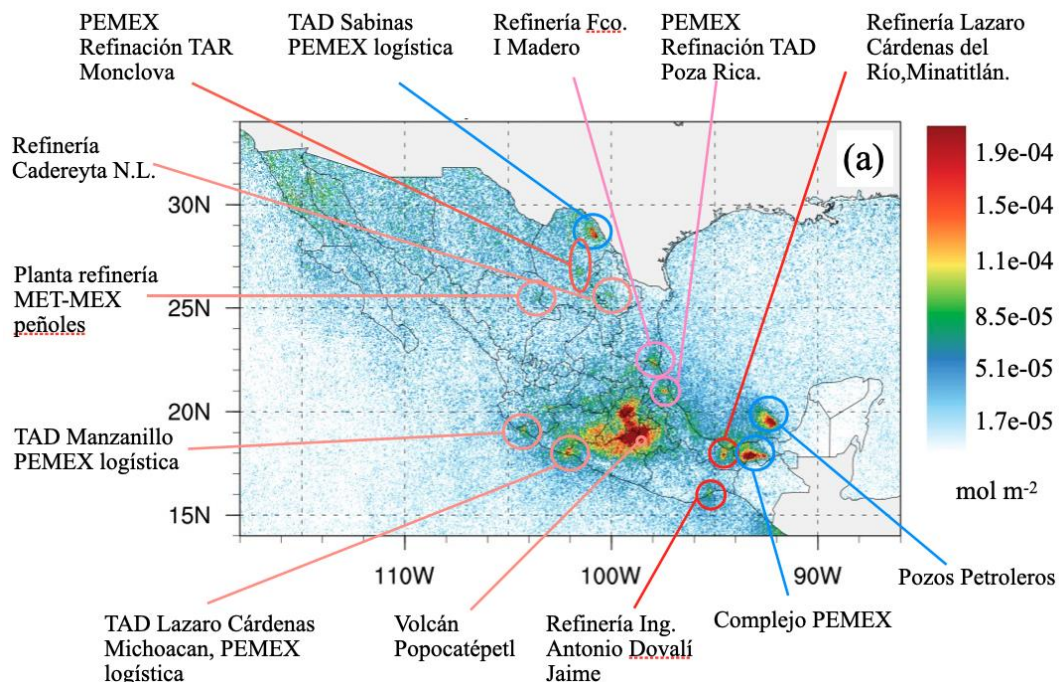


FIGURA 7. MUESTRA EL PROMEDIO ANUAL DE SO<sub>2</sub> CALCULADO A PARTIR DE LOS DATOS DE SENTINEL-5P.

Las fuentes identificadas en la Figura 4 se ubican de acuerdo a las coordenadas mostradas en la Tabla 2.

TABLA 2. UBICACIÓN DE LAS FUENTES DE SO<sub>2</sub> POR ZONAS

Región	Nombre	Lat (°N)	Lon (°W)
Norte	TAD Sabinas, COAH.	27.83	-101.13
Norte	PEMEX Refinación TAR Monclova, COAH	26.96	-101.44
Norte	Planta refinería MET-MEX Peñoles	25.52	-103.45
Norte	Refinería Cadereyta	25.59	-99.95
Norte	Carbonifera	28.46	-100.68
Pacífico	TAD Manzanillo PEMEX Logística	19.08	-104.28
Pacífico	TAD Lázaro Cárdenas PEMEX Logística	17.94	-102.16
Pacífico	Petalcalco Carboeléctrica	17.98	-102.12
Pacífico	Refinería "Antonio Dovalí" Salina Cruz, Oax.	16.21	-95.18
Golfo	Refinería Francisco I Madero	22.28	-97.84
Golfo	TAD Refinación Poza Rica	20.51	-97.48

Golfo	Refinería Lázaro Cárdenas del Río Minatitlán	17.98	-94.54
Golfo	Complejo PEMEX	17.90	-93.19
Golfo	Pozos Petroleros (ZAMA)	18.96	-93.73
Golfo	Pozos petroleros (Cantarell)	19.40	-92.24
Centro	Refinería Tula	20.05	-99.28
Centro	Volcán Popocatépetl	19.02	-98.62

---

Con la finalidad de comparar, empleamos datos de SO<sub>2</sub> que se obtienen del instrumento “Ozone Monitoring Instrument” (OMI; <https://so2.gsfc.nasa.gov/>) y encontramos que son consistentes con sentinel-5p. La figura 5 presenta los promedios anuales de emisiones de SO<sub>2</sub> (OMI) en el periodo 2005-2019. En este histórico podemos identificar que las emisiones antropogénicas más importantes se generan en las plataformas petroleras de PEMEX sobre el Golfo de México, en específico se identificó el sitio de Cantarell, así como la refinería de Tula, Minatitlán y Poza Rica. Así mismo, el volcán Popocatépetl tuvo ciertos periodos con emisiones de la misma magnitud que las emisiones antropogénicas.

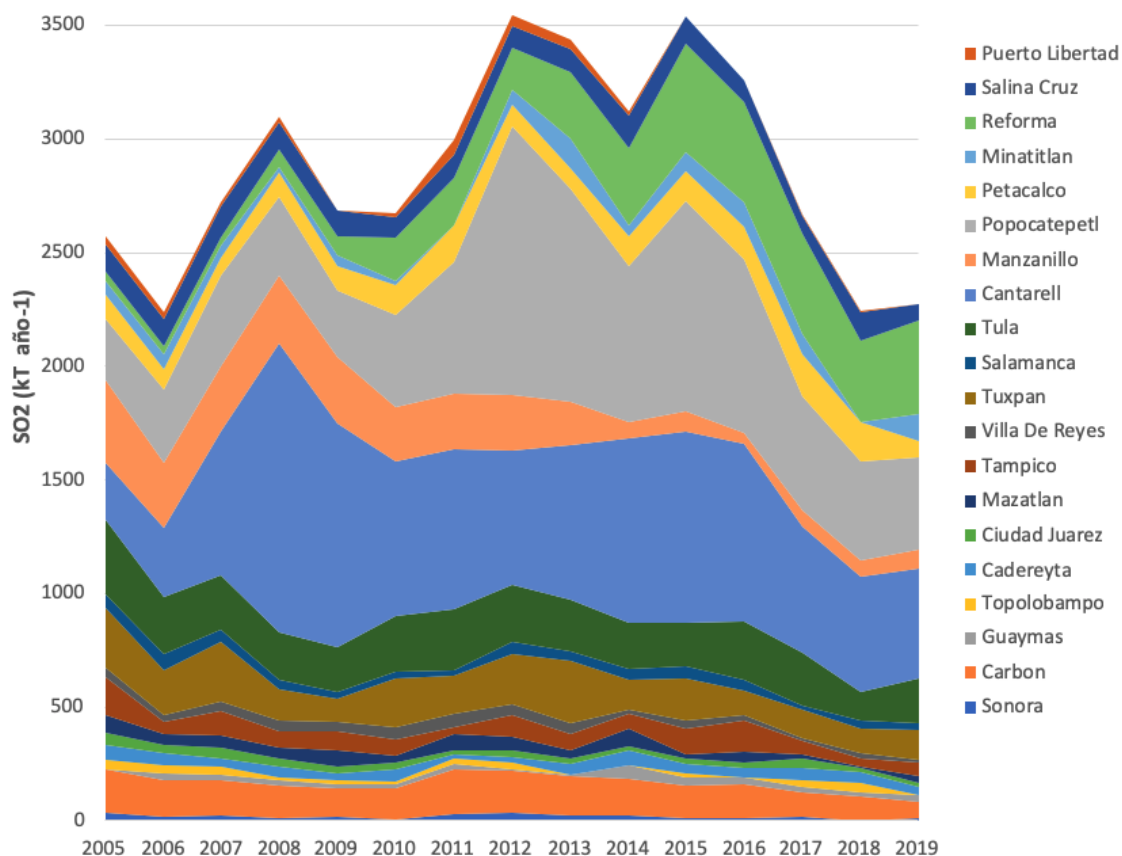


FIGURA 8. EMISIONES ANUALES DE SO<sub>2</sub> DESDE EL SATÉLITE OMI. (RECUPERADOS DE <https://so2.gsfc.nasa.gov/>)

Ahora, en la figura 6 se presentan las emisiones anuales de algunos de los sitios en México con mayores emisiones en el periodo de 2005-2019 empleando OMI. La principal fuente de emisiones de SO<sub>2</sub> se observó en Cantarell (19.44 N, -92.02 W). Sus emisiones varían entre 400-900 kT año<sup>-1</sup> y su máximo 1100 kT año<sup>-1</sup> ocurrió en 2008, como se aprecia en la figura 6(a). Por otra parte, en orden de importancia le siguen: el sitio de Tula (20.05 N, -99.28 W), el sitio de Reforma (17.89 N, -93.19 W), Tuxpan (21.02 N, -97.33 W). También son de relevancia las emisiones del Volcán Popocatépetl (19.02 N, -98.62). Es interesante observar que en el periodo 2008-2010 las emisiones del Popocatépetl oscilaron entre 200-400 kTon año<sup>-1</sup>, pero en el periodo de 2012-2016 aumentaron, variando entre 500-1200 kTon año<sup>-1</sup> semejante a las emisiones del sitio de Cantarell, finalmente vemos una disminución sostenida en el periodo de 2015 a 2018. Este último resultado claramente ligado con las políticas energéticas del estado mexicano en el periodo correspondiente.

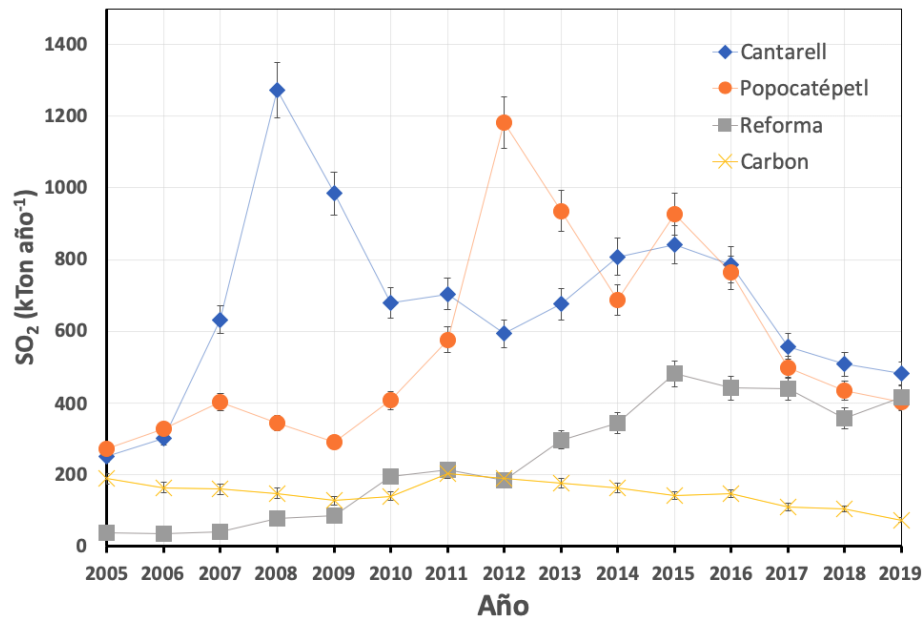


FIGURA 9. EMISIONES ANUALES DE SO<sub>2</sub> DE LAS FUENTES MAS RELEVANTES EN MÉXICO DE 2005-2019

## 4.2 TRAYECTORIAS ESTACIONALES DE SO<sub>2</sub>

Se construyen los mapas los mapas de frecuencias de trayectorias mensuales promedio para varios de los sitios con emisiones importantes de SO<sub>2</sub> a la atmosfera. Estos mapas nos ayudan a estudiar el comportamiento trimestral (DEF, MAM, JJA, SON) de las trayectorias hacia delante de las parcelas de aire y determinar con cierta precisión el área de impacto de estas emisiones por sitio de emisión.

#### 4.2.1 POZOS PETROLEROS DE PEMEX (CANTARELL Y ZAMA).

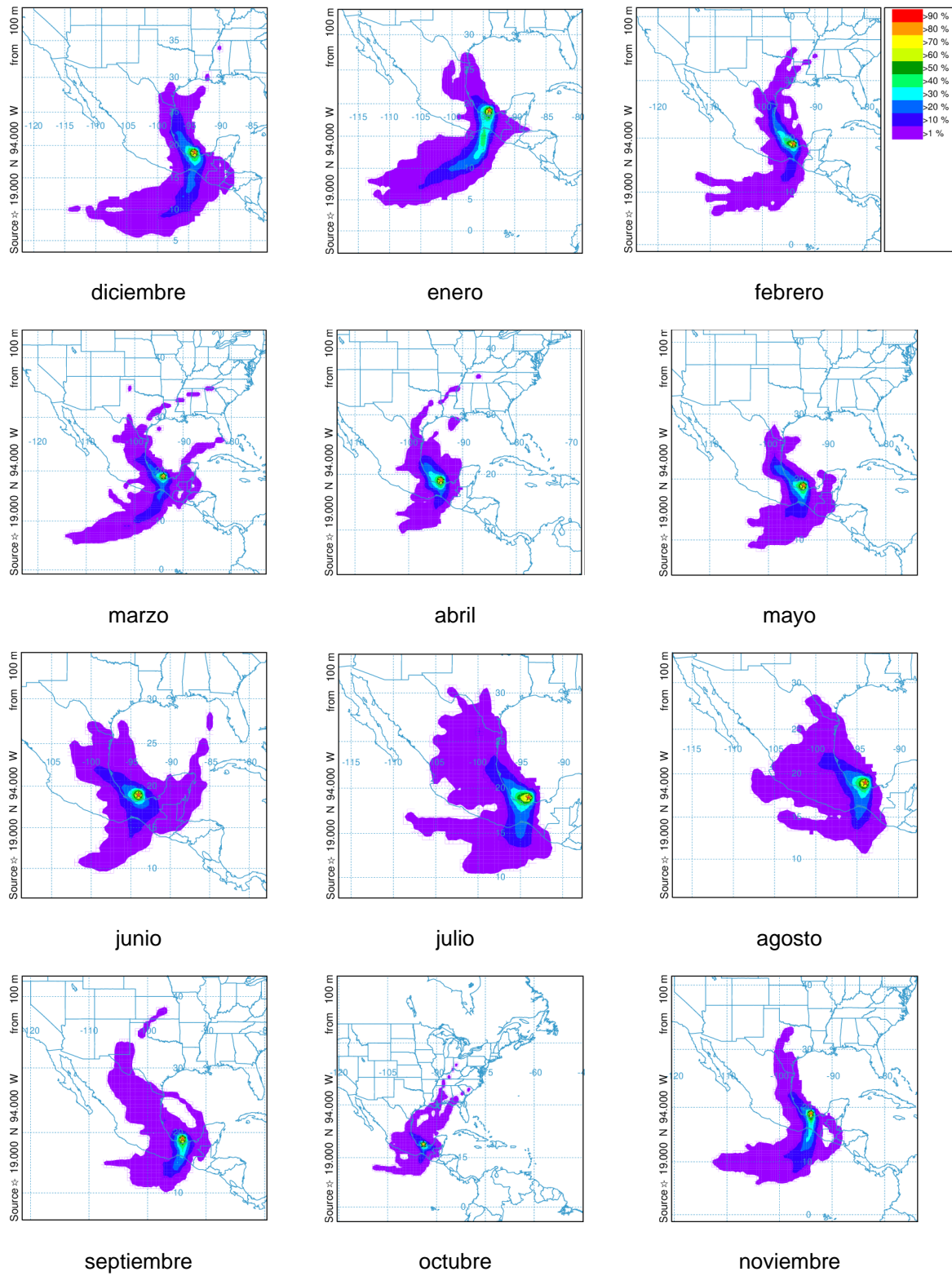


FIGURA 10. FRECUENCIAS MENSUALES DE TRAYECTORIAS DESDE EL SITIO DE POZOS PETROLEROS DE PEMEX EN EL GOLFO DE MÉXICO.

## 4.2.2 PACÍFICO TAD LÁZARO CÁRDENAS PEMEX

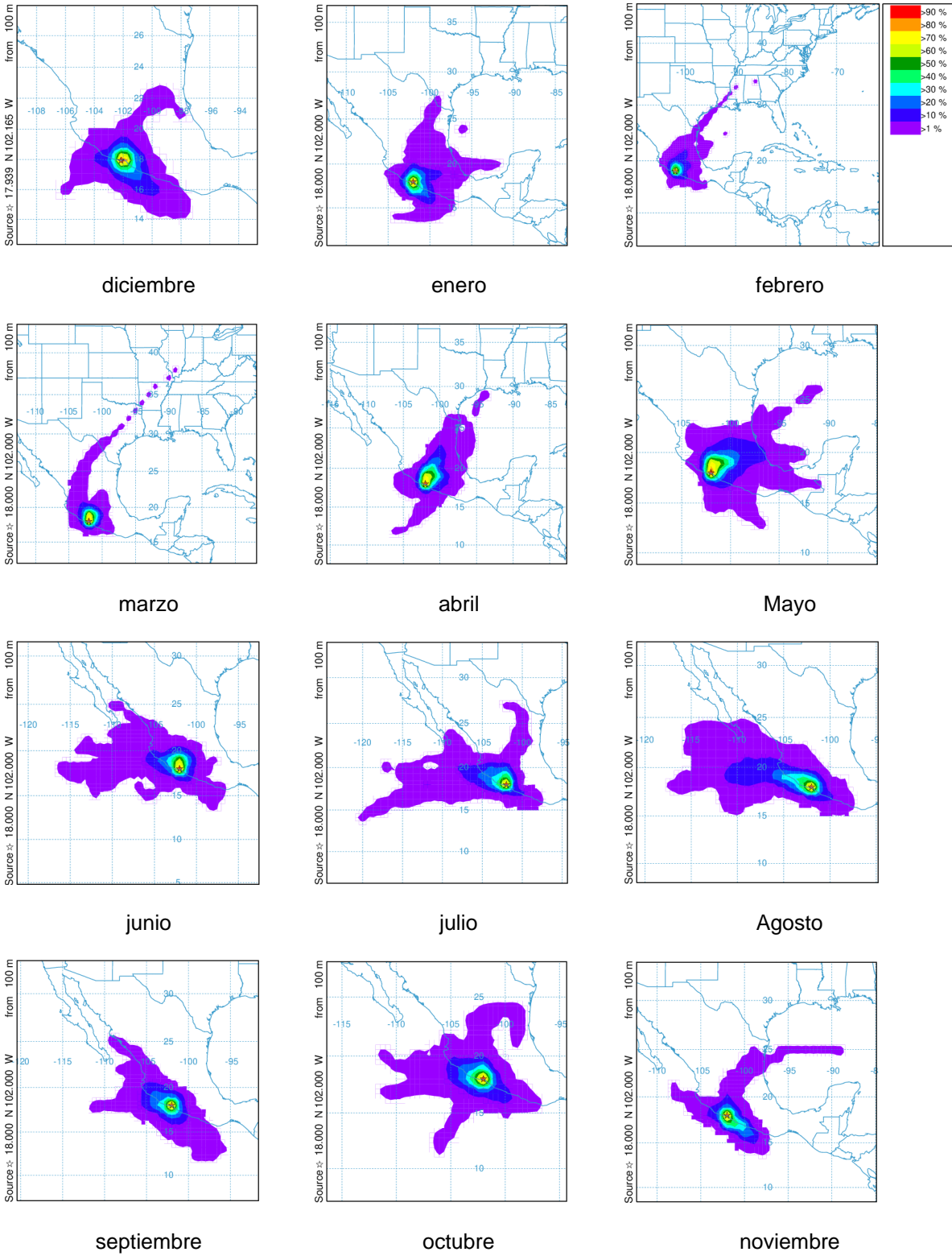


FIGURA 11. FRECUENCIA MENSUAL DE TRAYECTORIAS DE SO<sub>2</sub> EN (A) SEPTIEMBRE, (B) OCTUBRE Y (C) NOVIEMBRE.



#### 4.2.4 REFINERÍA FRANCISCO I MADERO, TAMAULIPAS.

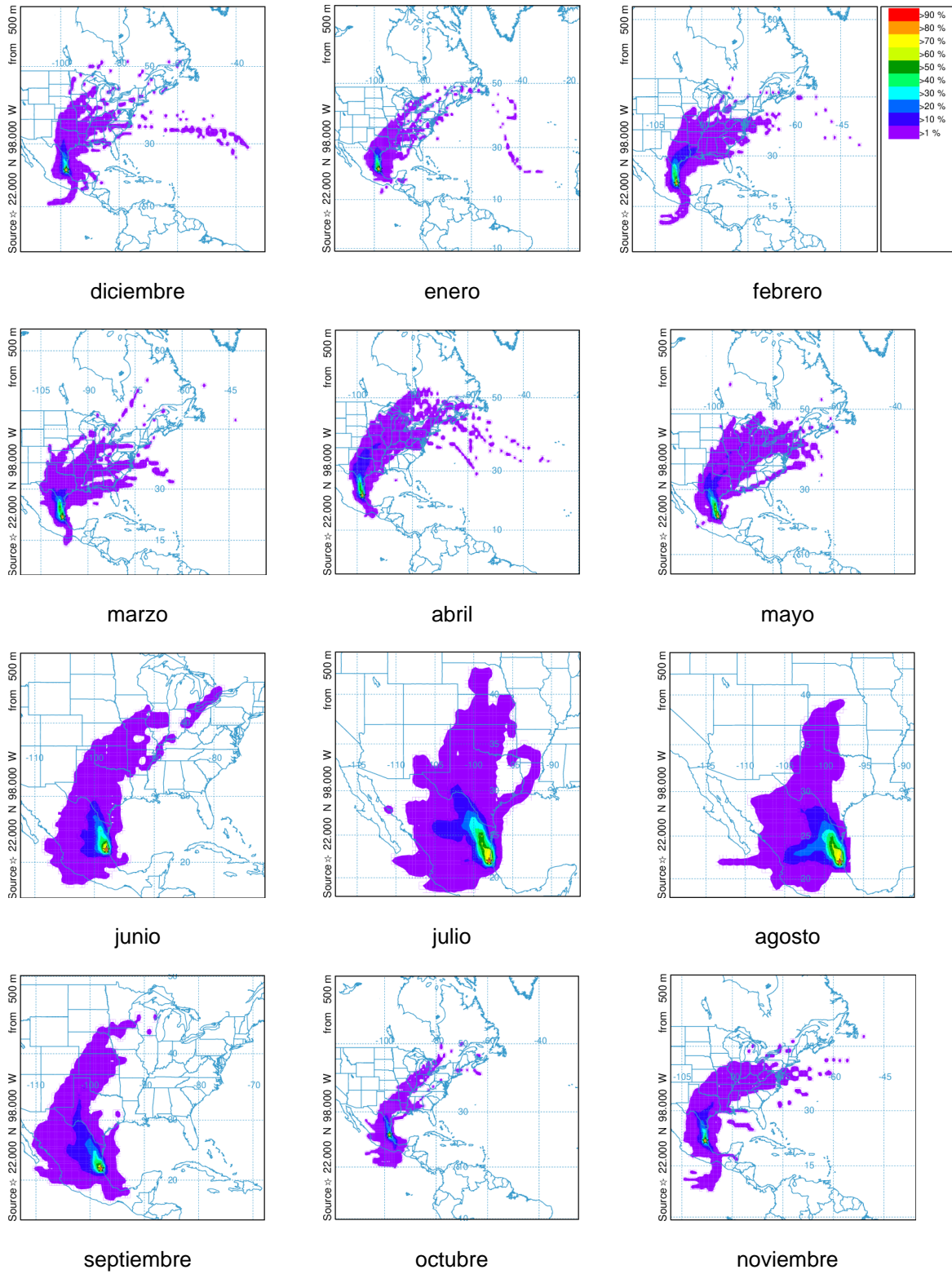


FIGURA 13. FRECUENCIA MENSUAL DE TRAYECTORIAS DE SO<sub>2</sub> HACIA DELANTE DESDE EL SITIO DE REFINERÍA FRANCISCO I. MADERO, EN CIUDAD MADERO, TAMAULIPAS.

#### 4.2.5 REFINERÍA DE TULA.

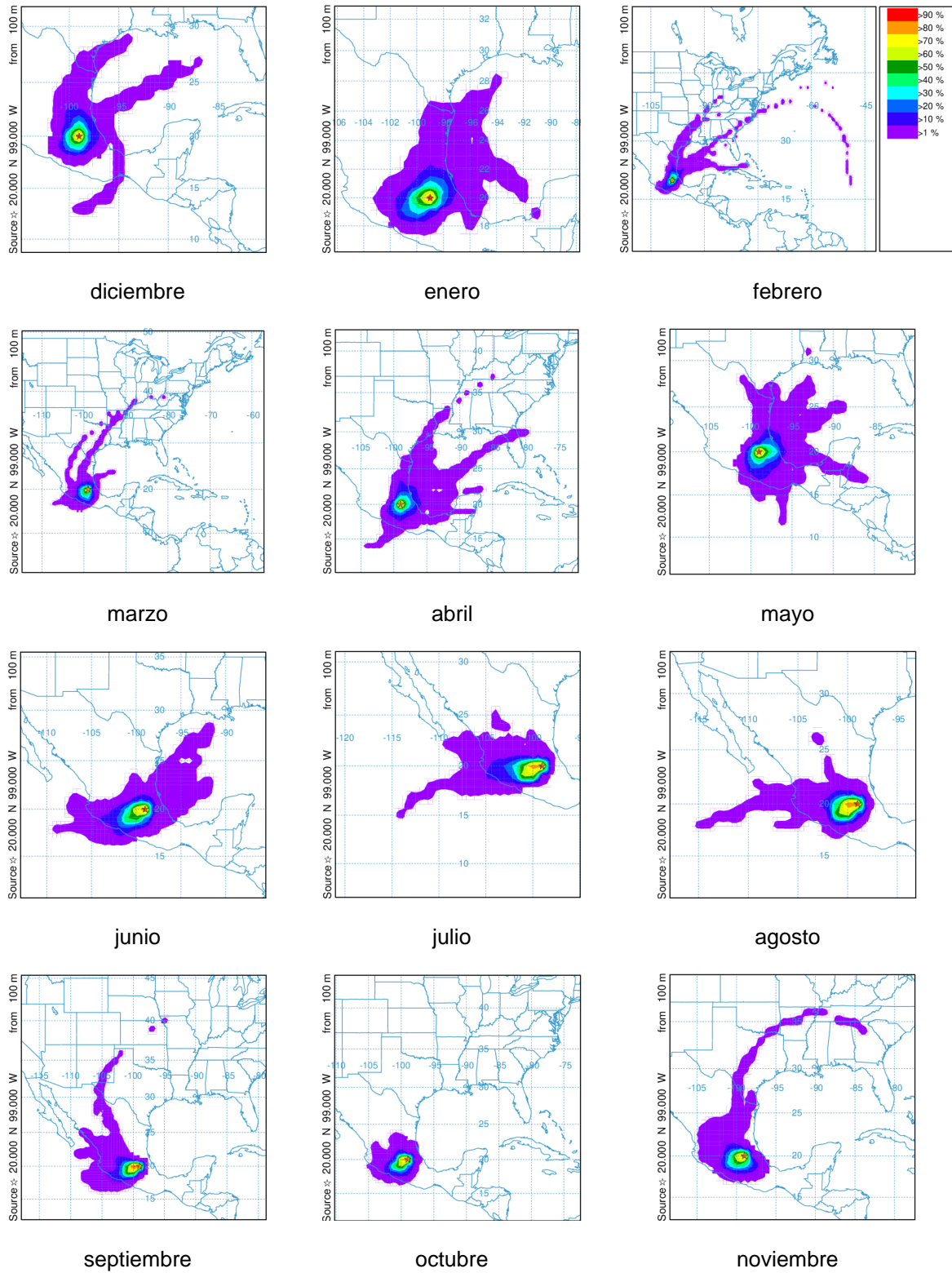


FIGURA 14. FRECUENCIA MENSUAL DE TRAYECTORIAS DE SO<sub>2</sub> HACIA DELANTE DESDE EL SITIO DE REFINERÍA DE TULA, HIDALGO.

#### 4.2.6 VOLCÁN POPOCATÉPETL

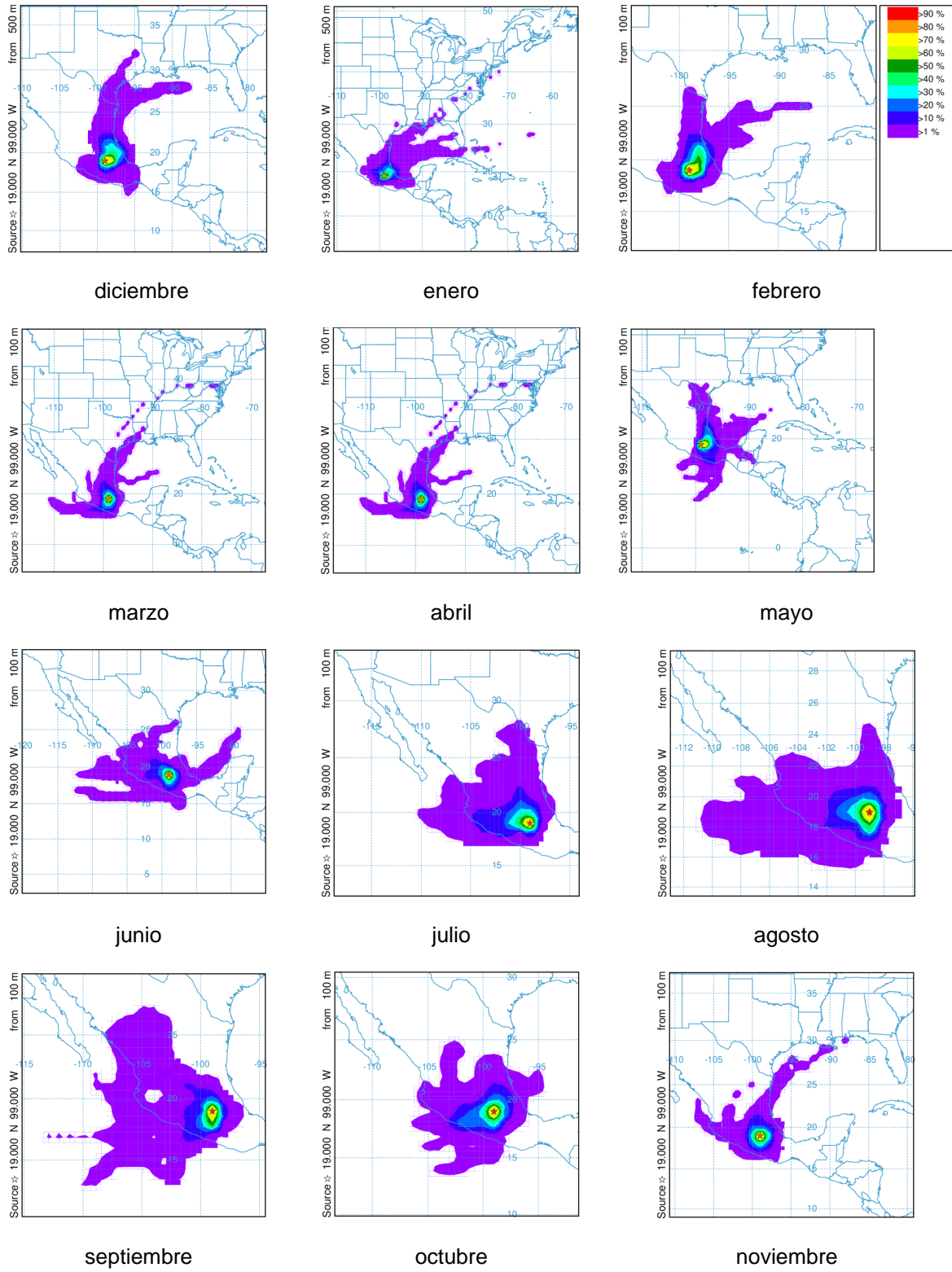


FIGURA 15. FRECUENCIA MENSUAL DE TRAYECTORIAS DE SO<sub>2</sub> HACIA DELANTE DESDE EL VOLCÁN POPOCATÉPETL

## 4.3 CASOS DE ESPECIALES DE ESTUDIO

### 4.3.1 Influencia del Sitio de Tula sobre la Zona Metropolitana del Valle de Toluca.

La Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT) cuenta con 6 sitios de monitoreo con suficiencia de datos. Los detalles sobre estos sitios se encuentran en la Tabla 3 (Anexo I). La figura 13 muestra los valores promedio mensuales (a) del índice de calidad del aire por  $\text{SO}_2$  (IC- $\text{SO}_2$ ) y (b) la temperatura media y precipitación, calculados a partir de los seis sitios de monitoreo. En la figura 13(a) se observan dos periodos donde el IC- $\text{SO}_2$  incremento. Estos corresponden al periodo de junio a septiembre y de diciembre a febrero en épocas de secas-frías. Primero, debemos señalar que es poco probable que en épocas de secas frías, pueda existir transporte de contaminantes desde Tula hasta la ZMVT, ya que la capa de mezclado está en sus niveles más bajos [25]. De manera que el máximo del IC- $\text{SO}_2$  observado en diciembre se atribuye a las emisiones locales. En contraste, en el otro periodo (junio-septiembre), la temperatura alcanza sus valores máximos, la capa de mezcla tiene su máxima altura, y bajo condiciones atmosféricas específicas, podría favorecer la posible influencia de las emisiones de la refinería de Tula sobre las concentraciones de  $\text{SO}_2$  monitoreadas en la ZMVT.

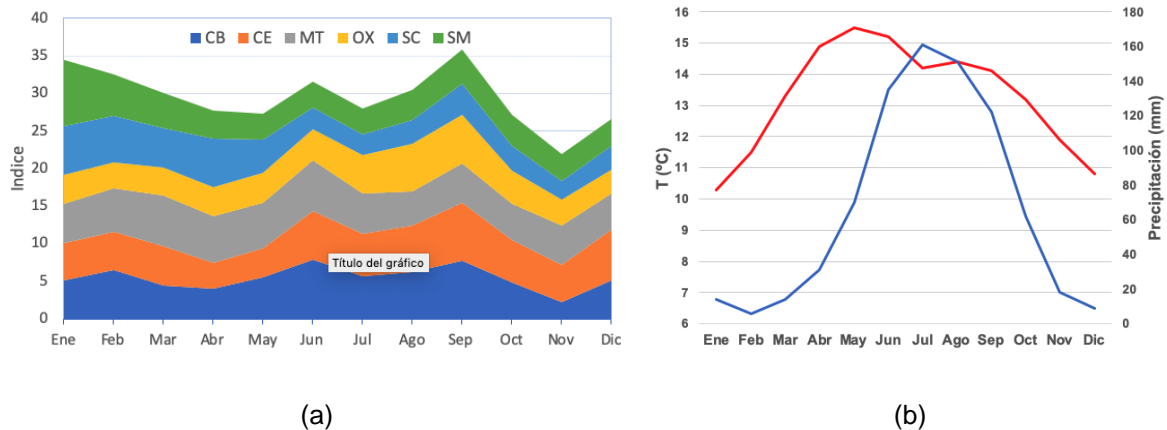


FIGURA 16. PROMEDIO MENSUAL (a) DEL ÍNDICE DE CALIDAD DEL AIRE POR  $\text{SO}_2$  Y (b) DE LLUVIAS (AZUL) A PARTIR DE LOS SITIOS DE MONITOREO DE LA ZMVT

Si bien es cierto que la influencia de las emisiones de la refinería de Tula sobre la zona norte de la Ciudad de México ha sido estudiada previamente [27]. Hasta donde sabemos, no se ha planteado la pregunta de estudiar la posible influencia de las emisiones de la Refinería de Tula sobre la ZMVT, siendo que el sitio de Tula se encuentra a ~100 km de distancia de la Ciudad de Toluca es factible tener el transporte de este contaminante. A partir de los mapas de frecuencias mensuales de la Figura 11 podemos inferir lo siguiente.

Si bien es cierto que durante los meses de marzo y abril no existen vientos predominantes que pudieran transportar el  $\text{SO}_2$  desde el sitio de Tula y que a partir de mayo hay vientos predominantes hacia el este y en menor proporción hacia el sur. En los meses de junio hasta octubre las frecuencias de las trayectorias hacia adelante, desde el sitio de Tula, se proyectan hacia el suroeste; es decir hacia la ZMVT, alcanzando mayores frecuencias en esta dirección en el mes de septiembre. Posteriormente, en los meses de octubre y noviembre se mantienen sin una dirección predominante. En septiembre el 70-80% de las trayectorias que llegan a la Ciudad de Toluca provienen del sitio de Tula, ver figura A1. Lo que sugerimos aquí, es que estos resultados podrían correlacionarse con las mediciones en superficie de los sitios de monitoreo de  $\text{SO}_2$  en la ZMVT.

#### 4.3.2 Zonas de “amortiguamiento de $\text{SO}_2$ ” en el sur de la Sierra Madre Oriental.

La figura 14 muestra las concentraciones promedio de  $\text{SO}_2$  en los meses de (a) febrero, (b) marzo y (c) abril, obtenidas a partir de los datos de sentinel-5p. Se pudo observar una acumulación de  $\text{SO}_2$  a finales de febrero y durante todo marzo en la Sierra Madre oriental, a la altura de San Luis potosí, Hidalgo y Querétaro. Esta zona es importante porque ahí se ubican la reserva de la Biosfera de Sierra Gorda, el parque nacional Mármoles, y una fracción de la reserva de la Biosfera de Meztitlán que albergan una cantidad sobresaliente de la biodiversidad del país [2].

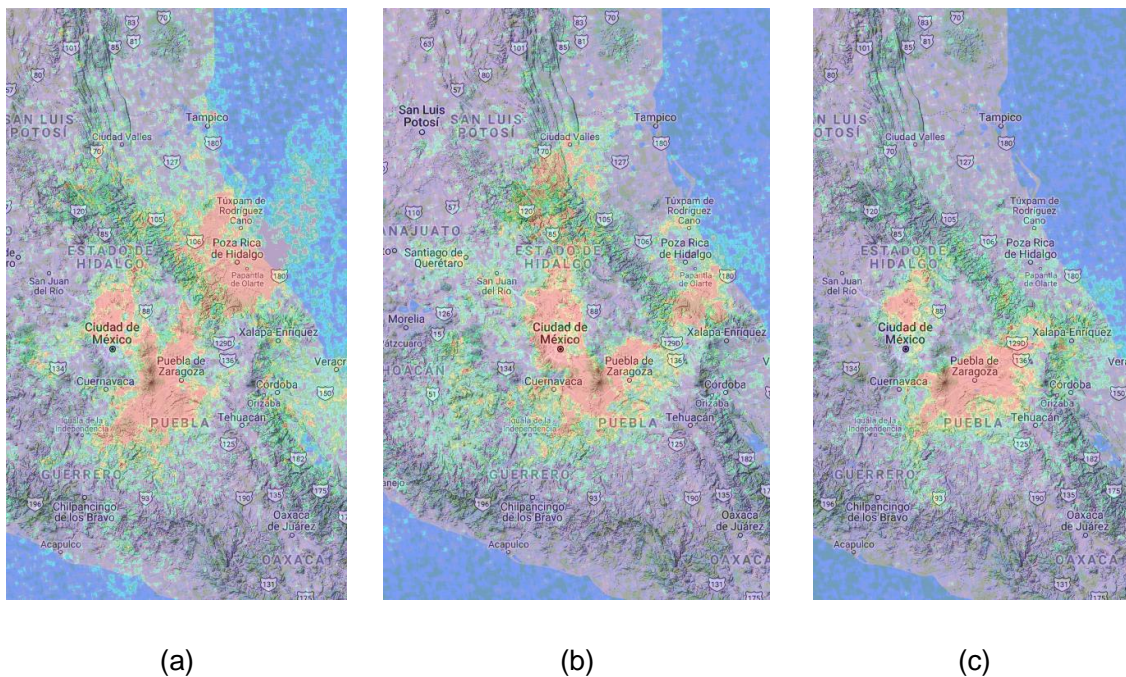


FIGURA 17. CONCENTRACIONES MENSUALES DE  $\text{SO}_2$  EN LOS MESES DE (A) FEBRERO, (B) MARZO Y (C) ABRIL.

Los meses donde se presenta este fenómeno, corresponden a la época de secas calientes, que favorecen el transporte de largo alcance de algunos contaminantes. Con base en los resultados de frecuencias de trayectorias, podríamos sugerir que las emisiones del volcán Popocatepetl, y probablemente en sinergia con una parte de las que se generan en la Ciudad de México, Hidalgo (Tula), se transportan hacia el norte y noroeste hasta quedar atrapadas en la parte sur de la cordillera montañosa de la Sierra Madre oriental. Las trayectorias mensuales que se originan desde el volcán Popocatepetl en el mes de febrero tienen una tendencia primero hacia el este y luego doblan su dirección hacia el norte, hasta alcanzar finalmente la región afectada en un 40-50% de las trayectorias. Esta frecuencia de trayectorias, relativamente alta se logra debido a la elevación del volcán (~5400 m) y es muy probable que lleguen hasta la sierra gorda que también se encuentra a una altura promedio de 3000 m.s.n.m. Es diferente con las emisiones de Ciudad de México que no se encuentran tan elevadas. Las emisiones desde la refinería de Tula para el mes de febrero, tienen una tendencia hacia el norte, con una frecuencia de trayectorias de 30% en la dirección norte.

#### ***4.3.3 Concentraciones de SO<sub>2</sub> en Morelos.***

Por otra parte, en agosto y septiembre las frecuencias de trayectoria predominantes desde el volcán Popocatepetl apuntan hacia el sur y sureste afectando la región de Morelos (ver Figura 12, en agosto). Esto explicaría las concentraciones observadas desde el espacio para el mes de septiembre. La figura 15 se muestra el mapa de concentraciones mensuales de SO<sub>2</sub> en septiembre (2019) con sentinel-5p, donde podemos apreciar la gran “mancha” de SO<sub>2</sub> sobre la región del Estado de Morelos.



**FIGURA 18. CONCENTRACIONES MENSUALES EN SEPTIEMBRE DE SENTINEL-9P**

El estado de Morelos cuenta con 4 sitios de monitoreo que pertenecen a red de SINAICA (Ocuituco, Zacatepec, Cuautla, Cuernavaca). Sin embargo, únicamente Cuernavaca cuenta con datos de  $\text{SO}_2$ . Después de calcular los promedios mensuales observamos que este sitio presenta en el año dos máximos de concentraciones de  $\text{SO}_2$  en los meses de mayo y noviembre respectivamente. Sin embargo, un solo sitio de monitoreo no proporciona suficiente información para confirmar si en el mes de septiembre existe una zona tan amplia donde se presenta el  $\text{SO}_2$ . Sabemos que localmente el Estado de Morelos cuenta con una distribución de emisiones de  $\text{SO}_2$  ( $\text{Mg año}^{-1}$ ) como se muestra en las figuras 16 y 17. Estas fuentes contribuyen en combinación con las emisiones del volcán Popocatepetl que se transportan en el mes de agosto.

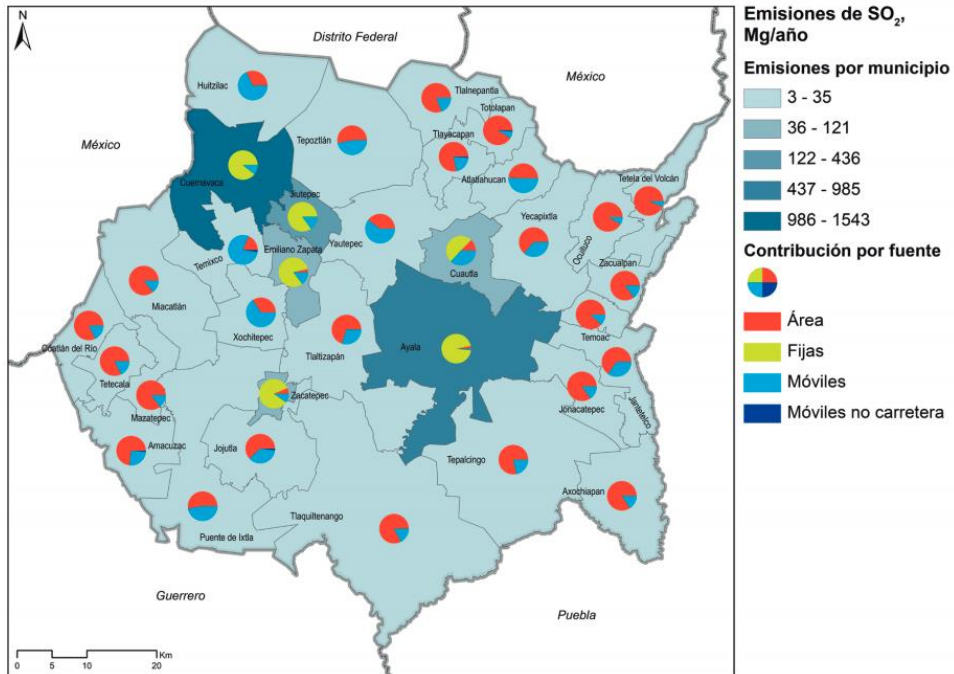


FIGURA 19. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE EMISIONES DE SO<sub>2</sub> ANIVEL MUNICIPAL Y SU CONTRIBUCIÓN PORCENTUAL POR TIPO DE FUENTE. FUENTE: TOMADO DEL INVENTARIO DE EMISIONES EN EL ESTADO DE MORELOS-2014

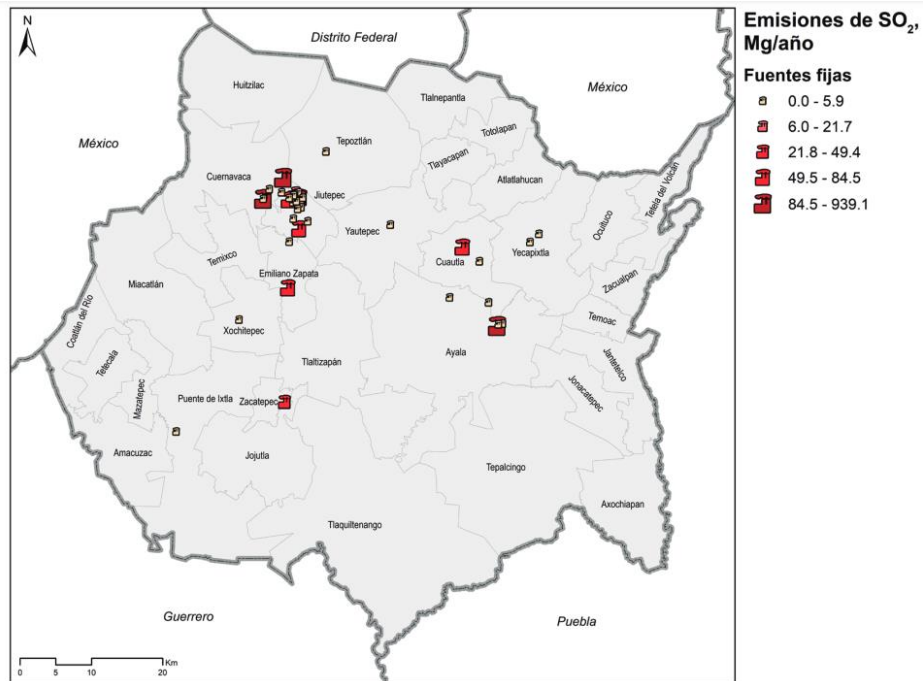


FIGURA 20. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS EMISIONES DE SO<sub>2</sub> POR FUENTES FIJAS. FUENTE: TOMADO DEL INVENTARIO DE EMISIONES EN EL ESTADO DE MORELOS-2014

## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Se investigó la localización de las principales fuentes de SO<sub>2</sub> empleando datos satelitales de sentinel-5p y se determinaron con cierta precisión las emisiones anuales de SO<sub>2</sub> de cada una de estas fuentes empleando los datos de OMI. Estos resultados señalan lo importante que son las emisiones del Volcán Popocatepetl, que dependiendo la época del año puede contribuir al deterioro de la calidad del aire en distintas zonas: Morelos, Sierra Gorda, Puebla, entre otras.

Las emisiones de las plataformas petroleras en el Golfo de México (Cantarell y Zama) se equiparán con las emisiones del volcán Popocatepetl en algunos años, que dicho sea de paso las colocan en la quinta posición a nivel global. En ciertas épocas del año las emisiones desde las plataformas tienen influencia en el deterioro de la calidad del aire en los estados de Tabasco, Chiapas, y la región del sureste en general. Como ya suponíamos, no siempre se pudo contar con datos de monitoreo de SO<sub>2</sub> en superficie y solo en algunos casos fue posible especular sobre la correlación de las concentraciones de SO<sub>2</sub> y los vientos provenientes de algunas fuentes. En específico la zona sur y sureste del país no cuenta con esta información. Por lo tanto, no fue posible determinar la influencia de las fuentes ubicadas en el golfo de México o en el pacífico sobre algunos sitios como Oaxaca, Chiapas, Tabasco, entre otros.

En general las emisiones de Cantarell y Zama son las más importantes en México, y están dentro de las 5 primeras a nivel global. Pero, también encontramos que la sinergia de las emisiones de las diversas actividades en la Megalópolis Central de México genera en conjunto una zona de altas concentraciones de SO<sub>2</sub>, equiparable a los promedios observados en el Golfo de México, pero desafortunadamente con una mayor extensión territorial, que pudiera potenciar los efectos negativos en salud sobre los casi 30 millones de personas que habitan esta zona.

Así mismo, aunque Morelos y Puebla forman parte de la Megalópolis no cuentan con suficientes datos, ni sitios de monitoreo de calidad del aire. Se requieren más puntos de monitoreo para poder determinar si en el mes de septiembre existen las concentraciones observadas en Morelos desde el espacio.

La ZMVT se supone afectada por las emisiones de la refinería de Tula en el período de junio-septiembre. Se sugiere conducir mediciones con diversos instrumentos para

determinar cuantitativamente la influencia de las emisiones de SO<sub>2</sub> desde la refinería de Tula hasta algunos sitios de la ZMVT. Así mismo, podría ser interesante llevar a cabo campañas de monitoreo para explicar la presencia de acumulación de SO<sub>2</sub> en la región sur de la Sierra Madre oriental y sus efectos sobre la biodiversidad.

Es importante señalar que en las fuentes de las zonas noreste de México también generan emisiones de SO<sub>2</sub> significativas, pero los vientos dominantes las preferencialmente por la zona costera hacia el norte, hasta los Estados Unidos. Finalmente, dada relevancia de las emisiones del volcán Popocatepetl se considera muy importante incluir en los inventarios de emisiones.

Este trabajo constituye un primer esfuerzo por conocer o delimitar las zonas de influencia de los principales emisores de SO<sub>2</sub> en México. Las zonas amortiguamiento sugieren la instalación o reubicación de sitios de monitoreo para determinar las concentraciones de SO<sub>2</sub> con mayor precisión. Esto con el fin de proveer elementos para (i) proteger la salud de las personas, y aporta (ii) elementos para comenzar el estudio de las implicaciones, positivas y negativas, del SO<sub>2</sub> sobre los elementos de la biodiversidad en la sierra Gorda.

## REFERENCIAS

1. Bravo A., H.; Soto A., R.; Sosa E., R.; Sánchez A., P.; Alarcón J., A.L.; Kahl, J.; Ruíz B., J. Effect of acid rain on building material of the El Tajín archaeological zone in Veracruz, Mexico. *Environ. Pollut.* **2006**, *144*, 655–660, doi:10.1016/j.envpol.2005.12.052.
2. Decretos, Programas de Manejo CONANP. (3 de mayo de **2021**). Sierra Gorda Reservas de la biosfera. <https://simec.conanp.gob.mx/ficha.php?anp=108&reg=7>.
3. Dominici, F.; Peng, R.D.; Bell, M.L.; Pham, L.; McDermott, A.; Zeger, S.L.; Samet, J.M. Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases. *J. Am. Med. Assoc.* **2006**, *295*, 1127–1134, doi:10.1001/jama.295.10.1127.
4. Draxler, R.R.; Hess, G.D. An overview of the HYSPLIT modeling system for Trajectory and Dispersion Applications. *Aust. Met. Mag.* **1998**, doi:10.1515/eqc-2014-0003.
5. Draxler, R.; Stunder, B.; Rolph, G.; Stein, A.; Taylor, A. *HYSPLIT USER's GUIDE Version 5- Last Revision: April 2020 1*;
6. Duan, L.; Hao, J.; Xie, S.; Du, K. Critical loads of acidity for surface waters in China. *Sci. Total Environ.* **2000**, doi:10.1016/S0048-9697(99)00347-2.
7. Dubey, S. Acid Rain-The Major Cause of Pollution: Its Causes, Effects and Solution. *Int. J. Sci. Eng. Technol.* **2013**, 2277–1581.
8. European Comission. Copernicus. Europe's eye on earth. European Union. **2015**. <https://www.copernicus.eu/es>
9. Graveland, J. Effects of acid rain on bird populations. *Environ. Rev.* **1998**, *6*, 41–54, doi:10.1139/a98-003.
10. Khaniabadi, Y.O.; Daryanoosh, S.M.; Hopke, P.K.; Ferrante, M.; De Marco, A.; Sicard, P.; Oliveri Conti, G.; Goudarzi, G.; Basiri, H.; Mohammadi, M.J.; et al. Acute myocardial infarction and COPD attributed to ambient SO<sub>2</sub> in Iran. *Environ. Res.* **2017**, *156*, 683–687, doi:10.1016/j.envres.2017.04.028.
11. Lee, S.J.; Kim, J.; Cho, C.H. An automated monitoring of atmospheric mixing height from routine radiosonde profiles over South Korea using a web-based data transfer method. *Environ. Monit. Assess.* **2014**, *186*, 3253–3263, doi:10.1007/s10661-014-3615-y.
12. Lillesand, T.; Kiefer R.W. Remote Sensing and Image Interpretation, Wiley, **1979**, 2-40-49.
13. Pandey, J.S.; Kumar, R.; Devotta, S. Health risks of NO<sub>2</sub>, SPM and SO<sub>2</sub> in Delhi (India). *Atmos. Environ.* **2005**, *39*, 6868–6874, doi:10.1016/j.atmosenv.2005.08.004.
14. Pedergrnana, M.; Loyola, D.; Apituley, A.; Sneep, M.; Veefkind, J.P. *Sentinel-5*

precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Sulphur Dioxide SO<sub>2</sub>, S5P-L2-DLR-PUM-400E, 2015-03-27; 2015.

15. Phillips, L.F. Barbara J. Finlayson-Pitts and James N. Pitts, Jr, Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere, *Journal of Atmospheric Chemistry*, **2001**, 323-231.
16. Qian, Y.; Behrens, P.; Tukker, A.; Rodrigues, J.F.D.; Li, P.; Scherer, L. Environmental responsibility for sulfur dioxide emissions and associated biodiversity loss across Chinese provinces. *Environ. Pollut.* **2019**, *245*, 898–908, doi:10.1016/j.envpol.2018.11.043.
17. Rivera, C.; Sosa, G.; Wöhrschimmel, H.; De Foy, B.; Johansson, M.; Galle, B. Tula industrial complex (Mexico) emissions of so<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> during the MCMA 2006 field campaign using a mobile mini-DOAS system. *Atmos. Chem. Phys.* **2009**, *9*, 6351–6361, doi:10.5194/acp-9-6351-2009.
18. Rodríguez, K.; Nazadeau, P. Resumen de las principales técnicas de percepción remota usadas en volcanes para monitorear las emisiones de gas en la superficie, *Revista Geológica de América Central, Universidad de Costa Rica* **2015**, *52*, Costa Rica.
19. Seibert, P. Convergence and accuracy of numerical methods for trajectory calculations. *J. Appl. Meteorol.* **1993**, *32*, 558–566, doi:10.1175/1520-0450(1993)032<0558:CAAONM>2.0.CO;2.
20. Sunnu, A.; Resch, F.; Afeti, G. Back-trajectory model of the saharan dust flux and particle mass distribution in west africa. *Aeolian Res.* **2013**, *9*, 125–132, doi:10.1016/j.aeolia.2013.02.005.
21. Tejeda Martínez, A. La humedad en la atmosfera. Bases físicas, instrumentos y aplicaciones. Universidad de Colima. Enfoque Académico. Colima. **2018**, 112-125.
22. Tu, F.H.; Thornton, D.C.; Bandy, A.R.; Carmichael, G.R.; Tang, Y.; Thornhill, K.L.; Sachse, G.W.; Blake, D.R. Long-range transport of sulfur dioxide in the central Pacific. *J. Geophys. Res. D Atmos.* **2004**, *109*, doi:10.1029/2003JD004309.
23. Wen, D.; Lin, J.C.; Zhang, L.; Vet, R.; Moran, M.D. Modeling atmospheric ammonia and ammonium using a stochastic Lagrangian air quality model (STILT-Chem v0.7). *Geosci. Model Dev* **2013**, *6*, 327–344, doi:10.5194/gmd-6-327-2013.
24. WHO *Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter , Ozone and Nitrogen Dioxide*; 2003;
25. Xing, Y.F.; Xu, Y.H.; Shi, M.H.; Lian, Y.X. The impact of PM<sub>2.5</sub> on the human respiratory system. *J. Thorac. Dis.* 2016, *8*, E69–E74.
26. Yates, T.; Coote, A.; Butlin, R. The effect of acid deposition on buildings and building materials. *Constr. Build. Mater.* **1988**, *2*, 20–26, doi:10.1016/0950-0618(88)90005-0.
27. Zhong, Q.; Shen, H.; Yun, X.; Chen, Y.; Chen, Y.; Ren, Y.; Xu, H.; Shen, G.; Du, W.; Du, W.; et al. Global Sulfur Dioxide Emissions and the Driving Forces. *Environ. Sci.*



## ANEXO I

Tabla 3. Sitios de monitoreo de SO<sub>2</sub> en la ZMVT

<b>Nombre</b>	<b>Alias</b>	<b>Latitud (N)</b>	<b>Longitud (W)</b>	<b>Dirección</b>
Ceboruco	CB	19° 15' 37.1"	99° 38' 44.6"	Calle Ceboruco S/N, Colonia Azteca, Código Postal 50640, Toluca, México entre las calles de Heriberto Enríquez y José Antonio Albarrán (Dentro de las instalaciones de la Preparatoria # 5 Ángel María Garibay Kintana de la UAEM).
Toluca Centro	CE	19° 16' 41.1"	99° 39' 23.1"	Gimnasio "Prof. Guillermo Ortega Vargas" de la UAEM, Calle Venustiano Carranza esq. Mariano Matamoros, Toluca, Méx.
Meteppec	MT	19° 16' 12.7"	99° 35' 42.7"	Calle Manzana # 20-A, Colonia Izcalli Cuauhtémoc V, Metepec, México, Código Postal 52176, entre las Calles de Manuel J. Clouthier y Calle Mango (en el Parque Ecológico).
Oxtotitlán	OX	19° 17' 0.40"	99° 41' 0.56"	Escuela Primaria "Carmen Serdán", calle Lago Caimanero esq. Laguna de la Asunción, Col. Nueva Oxtotitlán, Toluca, Méx.
San Cristóbal Huichochitlán	SC	19° 19' 38.0"	99° 38' 3.44"	Paseo de la Luz esquina Manuel Hinojosa Giles S/N, Poblado de San Cristóbal Huichochitlán, código Postal 50100, entre las Calles de Paseo de la Luz y República del Salvador (Dentro de las instalaciones de la Escuela Primaria Manuel Hinojosa Giles)
San Mateo Atenco	SM	19° 16' 49.5"	99° 32' 30.0"	Ave. Hacienda Tres Marías # 260 Colonia Santa Elena, San Mateo Atenco, Código Postal 52100, entre las calles de Hacienda de la Gavia y Niños Héroes (Dentro de las instalaciones del Tanque

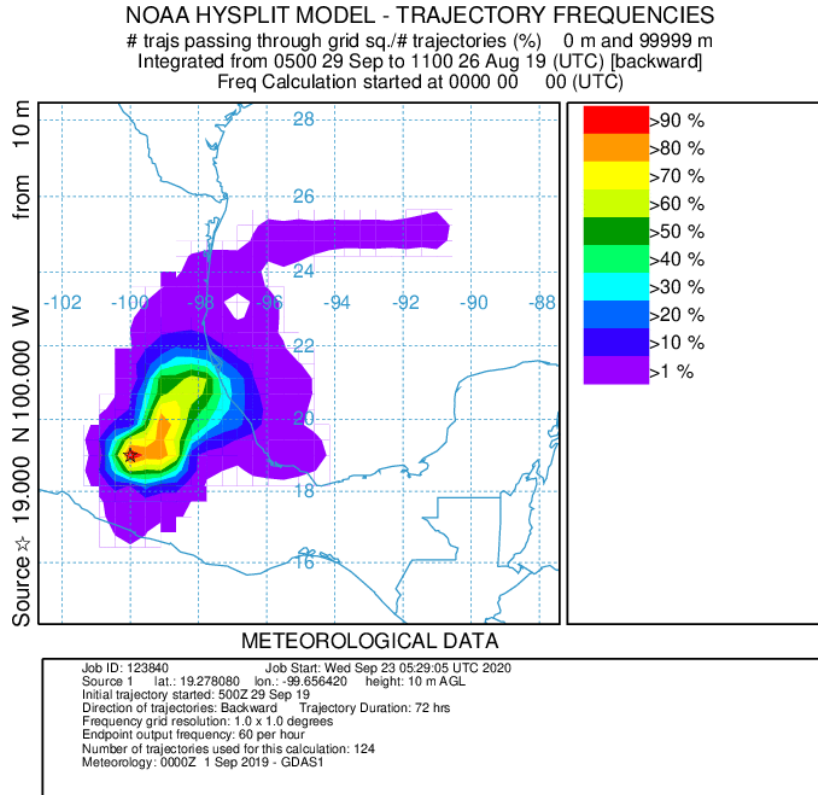


FIGURA A1. MAPA DE FRECUENCIAS MENSUALES DE TRAYECTORIAS HACIA ATRÁS DESDE EL SITIO DE TOLUCA. MUESTRA QUE EL 70-80% DE LAS FRECUENCIAS DE TRAYECTORIAS PARTEN DEL SITIO DE LA REFINERÍA DE TULA. RETROTRAYECTORIA DESDE EL SITIO DE TOLUCA, MUESTRA QUE DE EL 70-80% DE LAS FRECUENCIAS DE TRAYECTORIAS HACIA ATRÁS PARTEN DEL SITIO DE LA REFINERÍA DE TULA.