BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería

"Influencia del depósito de azufre sobre rendimientos de cultivos en México"

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

Licenciatura en Ingeniería Geofísica

PRESENTA

Ricardo Guzmán Vázquez

DIRECTOR EXTERNO

Dr. Marco Antonio Mora Ramírez

DIRECTOR INTERNO

M. en C. Julio César González Hernández

ASESORES

Dra. Guadalupe Azuara García

Dr. José Luis González Guevara

INGENIERÍA
FACULTAD

Puebla, Pue. Febrero 2020

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación de tesis se lo dedico antes que nada a Dios y la Virgen de Guadalupe por bendecirme siempre. A mi madre quien, con su gran amor, trabajo, dedicación y su enorme sacrificio por todos estos años de mi vida hemos salido adelante juntos. En especial a la memoria de mi hermanito quien ha sido mi inspiración en todo lo que realizo. A las personas que he amado profundamente, pero se me han adelantado en el camino, sé que jamás me han abandonado estén donde estén. Igual para las personas que me han apoyado incondicionalmente tanto en las malas como en las buenas han sido mi pilar; tías, tíos, primos y amigos. Y de igual forma a Toby y a Terry, mis perros, quienes son los qué me alegran, me llenan de amor puro día con día y me hacen ver la vida de la forma más linda posible.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco primero que todo a Dios y a la Virgen de Guadalupe por todas las bendiciones dadas en especial vida y salud. Gracias profundas a mi señora madre; Brillante Vázquez Gálvez por ser el principal motor de mi vida, por creer en mí, por los consejos, por los valores inculcados y por tu gran amor que no tiene límites. Agradezco enormemente al Dr. Marco Antonio Mora Ramírez por su confianza en mí para este proyecto, su dedicación, profesionalismo y su gran apoyo. Al Maestro Julio César González Hernández, Dr. José Luis González Guevara quienes me han apoyado en este caminar. Gracias a todos esos docentes que desde niño hasta ahora han significado mucho en este proceso. Y mi más sincero agradecimiento a todas las personas que estuvieron alentándome día con día, para cumplir mis sueños y nunca rendirme.

ÍNDICE

1.0 INTRODUCCIÓN 7
1.1 ANTECEDENTES 8
1.**2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA** 8
1.**2.1 JUSTIFICACIÓN** 8
1.3 OBJETIVO 9
1.3.1 ESPECIFICOS 9
1.4 LIMITACIONES 10
2. MARCO TEÓRICO 10
2.1 Emisiones de SO_2 y su depósito 10
2.2 SO_2 y las plantas 10
2.3 Normas y niveles críticos ambientales para el SO_2 11
2.4 ¿Cómo estimar las concentraciones de azufre en el aire? 12
2.5 Bases de datos de agricultura en México 13
3. METODOLOGÍA 13
3.1 Clasificación de cultivos 13
3.2 Estimación de $dsSO_2$ 14
3.2.1 Dominio espacial y temporal 15
3.2.2 Inventarios de emisiones 15
3.2.3 Configuración del modelo WRF-chem 16
3.3 Correlación de $dsSO_2$ y rendimiento de cultivos. 18
4. RESULTADOS 20
4.1 Inventarios de Emisiones en Tierra, Mar y Puertos. 20
4.2 Inventarios de Emisiones para WRF-chem 21
4.3 Depósito seco de SO_2 por municipio. 22
4.4 Bases de datos de agricultura 25
5. CONCLUSIONES 29
ANEXO 34
BIBLIOGRAFÍA 30
RESUMEN 7

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Esquema de la metodología de la investigación sobre la correlacion de $dsSO_2$ y rendimientos de cultivos en México 13
Figura 2. Muestra el dominio espacial de la modelización enmarcado con una línea punteada. En esta área se considerarán las emisiones de los barcos y las emisiones en tierra. Así mismo se muestra la ubicación de los cuatro principales puertos de México. Se muestra también la ubicación de sitios de monitoreo de diversos contaminantes como el $dsSO_2$, O_3, y las partículas (PM). Por último, las zonas sombreadas en azul corresponden al establecimiento de áreas de controlas de emisiones para Estados Unidos y México. 15
Figura 3. Etapas del proceso de modelización de la calidad del aire con WRF-chem 18
Figura 4. Emisiones de SO_2 (Ton ha^{-1} $año^{-1}$) a las 12:00 h en el dominio de modelización en (a) la superficie y (b) a una altura aproximada de 12 m sobre el nivel del mar. 22
Figura 5. Depósito seco anual de SO_2 (Ton ha^{-1} $año^{-1}$) en México 2011, como resultado de la modelización con WRF-chem. 23
Figura 6. Distribución espacial de los valores (a) medios, (b) máximos y (c) mínimos del $dsSO_2$ (Ton ha^{-1} $año^{-1}$) por municipio en México 2011, utilizando la herramienta estadística zonal como tabla en ArcGIS. 23
Figura 7. Valores medios del $dsSO_2$ en diversas regiones del mundo incluyendo nuestros resultados. Así mismo, se muestra el valor máximo de deposito seco de azufre (~39 Ton ha^{-1} $año^{-1}$). 25
Figura 8. Análisis de los cultivos con buena correlación entre el $dsSO_2$ y los rendimientos de acuerdo al tipo de técnica (riego y temporal) y su clasificación (sensibles o resistentes). 29

RESUMEN

El azufre ambiental es un nutriente clave en el desarrollo de las plantas. La actividad de los barcos puede producir hasta cuatro veces más emisiones que las derivadas de la actividad antropogénica en tierra. En este trabajo (i) utilizamos un modelo de calidad del aire (WRF-chem), que incluye las emisiones en tierra y de grandes barcos, así como datos de topografía, y meteorología, para calcular el depósito seco de azufre ($dsSO_2$). (ii) Se colectaron y validaron datos agrícolas de México y (iii) se investigó la correlación del depósito seco de azufre con los rendimientos de los cultivos en México a nivel municipal. Los resultados permiten determinar las zonas en el país con mayores depósitos de azufre y explicar las fuentes que los originan. En estas zonas se estimó que algunos cultivos disminuyen su rendimiento (10% - 60%), mientras que otros lo incrementan (20% – 150%) respecto al promedio nacional. En general no se observó diferencia significativa en los rendimientos cuando se comparan las técnicas de riego y temporal.

Palabras Clave. Modelización de calidad del aire, WRF-chem, depósito seco SO_2, cultivos, México.

1.0 INTRODUCCIÓN

A menos de que ocurra una explosión de un volcán, las emisiones de dióxido de azufre SO_2 provienen principalmente de la industria y los vehículos con motores de combustión interna. En el tema de la industria y los vehículos terrestres los gobiernos de los países del mundo han optado por diversas alternativas para manejar y reducir los niveles de azufre producidos por estos sectores, de modo que el efecto del SO_2 han disminuido progresivamente en la mayoría de las naciones industrializadas, específicamente en Europa del este (Vestreng et al., 2007). En contraste es, hasta hace relativamente poco tiempo que comenzaron a regularse las emisiones a la atmósfera de las grandes embarcaciones en el Mundo. México es signatario (2016) de un convenio internacional (MARPOL76/78, Anexo VI) para prevenir la contaminación del aire (NOx, SOx, PM) generada por grandes buques, y fue implementado para proteger la salud de las personas. Pero resulta necesario aún evaluar también el posible impacto de las emisiones de barcos sobre la biodiversidad (Abdulla et al., 2008), específicamente el posible impacto sobre los rendimientos de los cultivos. El azufre además de ser uno de los elementos clave en la formación de lluvia ácida (Dubey, 2013), es considerado como un nutriente secundario de las plantas. El SO_2 en concentraciones bajas puede estimular la fisiología y el crecimiento de las plantas, especialmente en las regiones con suelos con déficit de azufre, en esos casos el sulfato podría metabolizarse para satisfacer la demanda de azufre como nutriente. Sin embargo, una mayor absorción de SO_2 puede causar toxicidad y reducir el crecimiento y la

productividad de las plantas debido a la acumulación excesiva de iones sulfito y sulfato (Van Der Eerden et al., 1988).

1.1 ANTECEDENTES

El azufre se considera un elemento esencial para las plantas, tan necesario como el fósforo. El azufre en las plantas ayuda a formar enzimas importantes y promover la formación de proteínas vegetales (Astolfi et al., 2004). Se necesita en cantidades muy bajas, pero las deficiencias o exceso de este pueden causar serios problemas en las plantas (Dijkshoorn et al., 1967). Las deficiencias de azufre se han vuelto más frecuentes y la importancia del azufre en la producción de cultivos es cada vez más reconocida (Scherer et al., 2001; Zhao et al., 1999). Aunque se considera un nutriente secundario, ahora se está reconociendo como el "cuarto macronutriente", junto con el nitrógeno, fósforo y potasio. Los cultivos oleaginosos, las legumbres, los forrajes y algunos cultivos vegetales requieren azufre en cantidades considerables (Hell, 2004). En muchos cultivos, su cantidad en la planta es similar al fósforo. Las posibles deficiencias de azufre en la planta se pueden apreciar por inspección visual, pruebas en el suelo, entre otras (Kalaji et al., 2014; Mathot et al., 2009). El dióxido de azufre (SO_2) es una de las presentaciones del azufre en forma de gas que se encuentra en el aire. El SO_2 proviene de diversas fuentes, en el caso de las fuentes antropogénicas estas incluyen los procesos industriales, las emisiones de los vehículos terrestres (automóviles, camiones, etc.) y las emisiones generadas por los barcos que navegan cerca del país. En el caso de las fuentes naturales, los volcanes son los principales emisores. La industria en general ha mejorado sus procesos, haciéndolos mas limpios y eficientes. Diversas regulaciones disminuyen el contenido de azufre en los combustibles. Esto significa que esta fuente dejó de aumentar de manera tan drástica las emisiones de SO_2 a la atmosfera. Sin embargo, es poco conocido que, por otra parte, los barcos en el mundo comenzaron, y siguen hoy en día, aumentando su actividad comercial (Kiriazids et al., 2018). Aunado a esto, los barcos consumen grandes cantidades de combustible con especificaciones muy laxas en el contenido de azufre (Reders et al., 2005; Bouman et al., 2017). Todas estas emisiones contribuyen a aumentar el SO_2 ambiental y el SO_2 que por efectos mecánicos del viento se deposita en el suelo, contribuyendo al aumento de azufre en los suelos.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Ya que los barcos liberan grandes cantidades azufre a la atmósfera es indispensable conocer, cuál es el efecto del SO_2 sobre la biodiversidad En específico, el problema consiste en estudiar la correlación

entre los rendimientos de cultivos en México y las cantidades de SO_2depositadas en los suelos. Al mismo tiempo no se conocen con certeza los efectos del SO2 sobre los cultivos en México.
De lo anterior, resulta de utilidad determinar las zonas del país con los cultivos más sensibles a la exposición por SO2.

1.2.1 JUSTIFICACIÓN

Por una parte, como ya mencionamos, en los años 80's se hicieron muchos estudios sobre el impacto de las emisiones de la industria sobre el crecimiento de los cultivos y los bosques, justificados por el hecho de que la industria tuvo un crecimiento sostenido (Van Der Eerden et al., 1988; Garsed et al., 1982; Matsushimia et al., 1989; Hawksworth et al., 1970; Ashmore et al, 1988; Wentzel et al., 1983). Tiempo después, este tema dejó de ser de interés dado que las prospectivas señalaban la instalación de filtros, nuevas tecnologías más limpias y eficientes para mitigar y reducir las emisiones. Sin embargo, no se tomó en cuenta que las emisiones azufre, a nivel global, provenientes de los grandes barcos seguirían creciendo, y es hasta hace menos de una década que se comenzaron a regular las emisiones de los barcos (Tichavska et al., 2019). En este contexto es importante señalar que el inventario de emisiones de barcos para México presenta cantidades de azufre 3 a 4 veces más grandes que las emisiones en Tierra (Winnes, 2010). Así mismo, en otras regiones del mundo, se cuenta con mapas de amortiguamiento de nutrientes. En Europa, algunas zonas naturales protegidas, se encuentran catalogadas como zonas de amortiguamiento de SO_2, esto significa que existe la caracterización de los tipos de suelo, incluida las especificaciones de nutrientes, como el SO_2 (Ashmore et al., 1993). En México, sin embargo, hasta donde sabemos, no existe este tipo de información; mapas sobre datos de mediciones en suelo para determinar si ciertas zonas del país requieren azufre o podrían soportar depósitos. Por esta razón es importante realizar esta investigación.

1.3 OBJETIVO

Emplear el modelo WRF-chem para estimar depósito seco de azufre crítico para las plantas y correlacionar, empleando herramientas de geoprocesamiento de datos, con el rendimiento de los cultivos en México

1.3.1 ESPECÍFICOS

- Procesar los inventarios de emisiones con SIG para modelización.
- Ejecutar el modelo WRF-chem instalado en el cluster del LNS para calcular el depósito seco de azufre ($dsSO_2$)

- Estimar el depósito seco anual de azufre por municipio empleando SIG para su posterior análisis de correlación con los rendimientos de los cultivos.
- A partir de bases de datos públicas colectar y validar datos (rendimiento, superficie sembrada, etc.) de cultivos en México para buscar su correlación con los depósitos de azufre.
- Correlacionar usando geoestadísitca entre los datos de cultivos con el depósito seco de azufre por municipio para estimar las zonas del país con mejoras y disminución en los rendimientos.

1.4 LIMITACIONES

A pesar de que nuestros resultados fueron estadísticamente validados, debemos enfatizar que existen muchos factores (genéticos, climáticos, bióticos, socio económicos, fisiográficos, edafológicos) que pueden influir en el desarrollo de los cultivos. Los resultados deben ser tomados tomando en cuenta estas posibles limitaciones.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Emisiones de SO_2 y su depósito.

El dióxido de azufre (SO_2) es un gas incoloro con un característico olor irritante, se encuentra dentro de los llamados gases de vida corta. Los volcanes y los incendios son las principales fuentes naturales de esta molécula (Reddy et al., 2002). Pero aproximadamente el 85-95% del SO_2 proviene de fuentes humanas o antropogénicas. La industria es la principal emisora de esta especie química (Badr, 1994), por ejemplo, la generación de energía eléctrica a partir de carbón, las refinerías, metalúrgica. También, algunos minerales que poseen azufre al ser procesados liberan dióxido de azufre a la atmósfera. Así mismo, las emisiones de los vehículos terrestres y marítimos con motores de combustión interna generan emisiones de dióxido de azufre. El SO_2 que se encuentra en la parte alta de la troposfera, por ejemplo, el generado por una erupción volcánica, puede formar sulfatos (aerosoles) que contribuyen al cambio climático. En la parte baja de la troposfera, cerca de la superficie de la Tierra, puede reaccionar fácilmente con otras sustancias para formar compuestos tóxicos, provocando la lluvia ácida (Cape, 1993), degradar la calidad del aire y provocar impactos hasta ahora poco estudiados sobre la biodiversidad. Este último punto, se debe a una combinación del efecto del SO_2 en el aire y el que se deposita en el suelo. La remoción o depósito del SO_2 atmosférico que lo lleva finalmente al suelo, se lleva a cabo a través de dos mecanismos: (a) El llamado *depósito húmedo* que ocurre por la lluvia, y (b) el *depósito seco*, que se explica por efectos mecánicos del viento y el contacto del SO_2 con la superficie, que de aquí en adelante denominaremos $dsSO_2$.

2.2 SO_2 y las plantas

Ahora bien, el azufre es un elemento esencial para las plantas y normalmente las plantas lo toman desde el suelo en forma de sulfato, y al mismo tiempo el SO_2 en el aire proporciona azufre a la planta. Las plantas dependen por lo tanto de un contenido óptimo de azufre, es decir la deficiencia o exceso del SO_2 puede inhibir el crecimiento de las plantas, dañar las hojas y contribuir a muerte prematura. La fotosíntesis es uno de los procesos más afectados por altas concentraciones de SO_2 en la planta (Ziegler, 1972). Finalmente el SO_2 puede afectar la fijación de carbono, y los contenidos clorofílicos, que afectan el crecimiento de la planta (Bell and Treshow, 2002; Khan and Khan, 2011; Skrynetska et al., 2018). El SO_2 penetra en las hojas de las plantas a través de estoma, y hay evidencia que en menor proporción también por la cutícula. La apertura del estoma es controlada por las condiciones ambientales, como la humedad, la temperatura y la intensidad de la luz. Estos factores externos afectan la tasa de ingesta de SO_2 y por lo tanto el grado de daño. Cuando el estoma está cerrado, como ocurre en la noche o condiciones muy secas, entonces la resistencia a la entrada del gas es muy alta, y la planta tiene un grado muy bajo de susceptibilidad al daño. Sin embargo, algunas plantas como los líquenes y los musgos no tienen una capa protectora por esa razón son extremadamente sensibles a la exposición del SO_2 (Fields et al., 1988). Estos efectos del azufre afectan finalmente los rendimientos de los cultivos (Fowler et al., 1988; Adaros et al., 1991; Colls et al., 1992).

2.3 Normas y niveles críticos ambientales para el SO_2

Para prevenir los niveles de riesgo en salud por altas concentraciones de SO_2 en la atmosfera en México existe la NOM-022-SSA1-2010. Así mismo, México es signatario del convenio internacional para prevenir la contaminación del medio marino y el aire (MARPOL-Anexo VI) de la organización Marítima Internacional, y se comprometió en el 2016 a establecer una zona de control de emisiones de SO_2 (SECA, por sus siglas en inglés) donde se prevé prevenir los riesgos en la salud por exposición a niveles riesgosos de SO_2 provenientes de los barcos. Sin embargo, no existe legislación especifica para proteger la biodiversidad ante el potencial impacto del SO_2.

A nivel internacional, se han establecido desde 1992 umbrales de concentración o dosis de SO_2 gaseoso por encima de los cuales podrían ocurrir efectos adversos sobre plantas y cultivos (Jager et al., 1992). La Tabla 1 muestra los niveles críticos de SO_2 en 4 categorías de plantas y cultivos: líquenes, bosques, vegetación semi natural y cultivos agrarios. La excedencia de los niveles críticos

de vegetación semi natural, bosques, y en algunos casos en los cultivos agrícolas ocurren cuando la concentración media anual o semestral en invierno es mayor que los niveles críticos.

Tabla 1. Niveles críticos para SO_2 ($\mu g\ m^{-3}$) por categoría de vegetación.

Tipo de vegetación	Nivel Crítico de SO_2 ($\mu g\ m^3$)	Periodo de Tiempo
Líquenes cianobacterianos	10	Promedio anual
Ecosistemas forestales*	20	Promedio anual y bi-anual (Oct-Mar)
Semi-Naturales	20	Promedio anual y bi-anual (Oct-Mar)
Cultivos agrícolas	30	Promedio anual y bi-anual (Oct-Mar)

* El ecosistema forestal incluye la respuesta de la vegetación del sotobosque.

Para determinar los niveles de SO_2 en el aire, pueden utilizarse técnicas de absorción infrarroja, mientras que para determinar la tasa de depósito seco del dióxido de azufre ($dsSO_2$) en superficie es posible utilizar un absorbente de peróxido de plomo, por ejemplo, empleando una técnica (ASTM G91-97) estándar para monitorear el depósito SO_2 placa de sulfatación (Baumgardner et al., 2002). Más recientemente, se emplean datos satelitales para estimar el $dsSO_2$ (Nowlan et al., 2014).

2.4 ¿Cómo estimar las concentraciones de azufre en el aire?

Además de las mediciones, también es posible estimar las concentraciones de especies químicas en la atmósfera, utilizando los llamados modelos de calidad del aire (Daly, 2007; Chang, 2004). En general estos utilizan ecuaciones matemáticas y herramientas numéricas para simular los procesos fisicoquímicos que influyen sobre las concentraciones de ciertas especies químicas en el aire; mientas se transportan, se transforman químicamente, se emiten y depositan en la superficie, todo esto ocurriendo en el contexto de la meteorología presente. Es muy importante destacar que las predicciones sobre las concentraciones de algún contaminante que se realizan con los modelos de calidad del aire dependen de los datos de entrada, en específico de los inventarios de emisiones. Estos corresponden a bases de datos de las emisiones de los contaminantes y especies químicas que libera la industria, el transporte terrestre y marítimo, las de los comercios y servicios, casas habitación, vegetación y suelo que se generan en el país, esto incluye las emisiones en superficie de tierra y en mar (barcos). En este último punto en particular es importante señalar que las emisiones del transporte marítimo, fueron contabilizadas por primera vez en México en el año 2014 por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) en colaboración con la Universidad de Delaware, dando lugar al primer Inventario Nacional de Emisiones de Barcos (INEB) y se actualizaron las emisiones generadas por las actividades en los 5 principales puertos del país,

Inventario Nacional de Emisiones en Puertos (INEP). Finalmente, en cuanto al grueso de las emisiones en tierra, se realiza la contabilización de estas desde 1995, cada tres años, dando lugar al Inventario Nacional de Emisiones de México (INEM).

2.5 Bases de datos de agricultura en México

El Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) es una base de datos del gobierno federal donde se encuentra información estadística sobre producción de la agricultura mexicana en forma anualizada para más de 550 productos, y sobre el avance mensual de las siembras y cosechas para 64 productos estratégicos del campo mexicano. Estos datos están clasificados de acuerdo con tipos de cultivo (perene, cíclico, etc.) y se encuentran desagregados por municipio desde al año 2001 hasta el año 2018.

3. METODOLOGÍA

La Figura 1 muestra de manera esquemática las etapas de la metodología que seguimos para lograr los objetivos de estas tesis. Las siguientes subsecciones brindan detalle de cada etapa de la metodología.

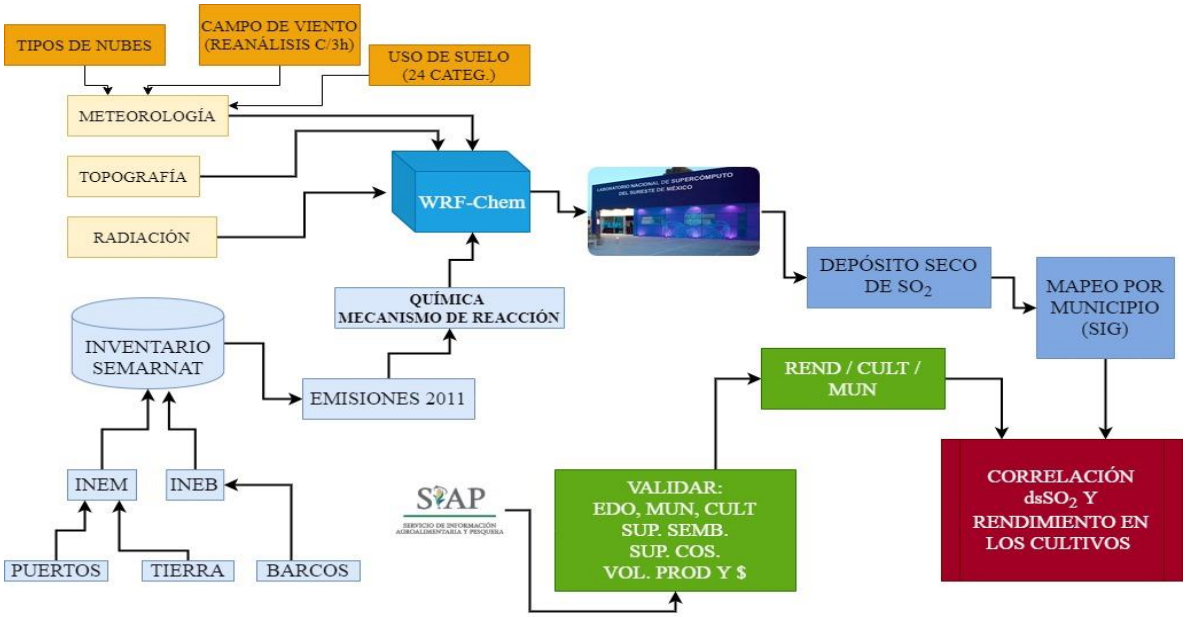

Figura 1. Esquema de la metodología de la investigación sobre la correlación de $dsSO_2$ y rendimientos de cultivos en México

3.1 Clasificación de cultivos

Se colectaron y verificaron los datos del SIAP 2011, y con base en la literatura (SIAP, 2018) pudimos agregar una categoría adicional sobre su sensibilidad de los cultivos a la exposición al azufre. Se construyen mapas de distribución de diversos cultivos en México a nivel municipal. Este último es

nuestra unidad espacial mínima en el estudio. La Tabla 2 muestra el área (ha) sembrada para diversos cultivos en México (2011), y clasifica los cultivos de acuerdo a su resistencia (R) o sensibilidad (S) a la exposición por azufre.

*Tabla 2. Superficie plantada de cultivos sensibles (S) y resistentes (R) al dsSO_2 en México 2011, excepto aquellos marcados con * que se basan en el informe SIAP 2018, y también catalogados como perennes (P) y cíclicos (C).*

Cultivo	**Superficie plantada (ha)**	**Fracción respecto al nivel Nacional (%)**	**Sensibilidad**	**Tipo**
Acelga	246.87	27.7	S	C
Alfalfa achicalada	31,549.00	21.6	S	P
Alfalfa verde	136,632.11	57.0	S	P
Arvejón	494.95	34.1	S	C
Avena forrajera achicalada*	16420	50.6	S	C
Avena forrajera seca*	7698.58	54.1	S	C
Avena forrajera verde	497,709.95	78.9	S	C
Avena grano	32,549.60	75.1	S	C
Calabacita	10,903.70	37.2	R	C
Calabaza	1,403.76	17.5	R	C
Cebada forrajera verde	12,634.20	67.9	S	C
Cebada grano	186,159.15	51.5	S	C
Ciruela	10,114.24	67.0	S	P
Frijol	1,437,526.84	85.8	S	C
Haba grano	5,836.45	28.0	S	C
Haba verde	3,543.44	30.5	S	C
Maíz forrajera en verde	438,742.89	74.3	R	C
Maíz grano	4,893,709.09	64.9	R	C
Melón	10,133.45	51.6	R	C
Níspero	11.99	85.7	S	P
Nuez	38,583.15	31.3	S	P
Pepino	9,953.53	49.3	R	C
Plátano	55,540.06	69.2	S	P
Trigo grano	195,982.65	29.6	S	C
Uva	7,395.08	21.9	S	P
Zanahoria	6,790.88	59.0	S	C

3.2 Estimación de $dsSO_2$

Para estimar el $dsSO_2$ empleamos el modelo de calidad del aire Weather Reseach Forecast (WRF-chem) (Grell et al., 2005; Tuccella et al., 2012) con el módulo químico habilitado (Gao et al., 2016; https://www2.acom.ucar.edu/wrf-chem). Esto nos permite calcular el $dsSO_2$ en suelo y verificar los resultados al comparar con mediciones en diversas partes del mundo. Las siguientes subsecciones proveen detalles sobre la modelización de calidad del aire: el dominio espacial y temporal de la simulación numérica, así como los datos que alimentan el modelo, y la configuración del mismo.

3.2.1 Dominio espacial y temporal

La Figura 2 muestra la zona de estudio, que se extiende desde los 10º N hasta los 35º N de latitud y desde -80º O hasta -130º O de longitud, representando un área aproximada de $15x10^6$ km^2 donde habitan alrededor de 123 millones de habitantes (INEGI, 2017). Se muestra la ubicación de los 4 principales puertos en México: Manzanillo (Man), Veracruz (Ver), Acapulco (Aca), y Altamira en Tamaulipas (Alt) donde ocurren actividades que generan emisiones que se contabilizan en los inventarios. Así mismo, se localizan los sitios en superficie donde se miden contaminantes ($dsSO_2$, O_3 y PM) y parámetros meteorológicos (T, P, Ws, Hr) en las redes de la Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la Secretaría de Marina (SEMAR). Por último, tenemos un par de zonas en azul que corresponden a las zonas de control de emisiones (ZCE) de Estados Unidos y México.

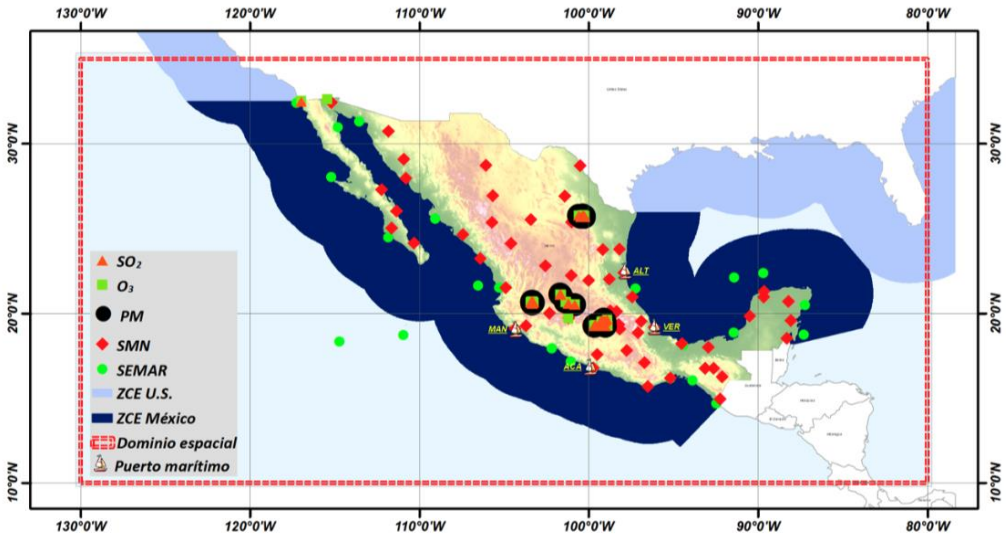

Figura 2. Muestra el dominio espacial de la modelización enmarcado con una línea punteada. En esta área se considerarán las emisiones de los barcos y las emisiones en tierra. Así mismo se muestra la ubicación de los cuatro principales puertos de México. Se muestra también la ubicación de sitios de monitoreo de diversos contaminantes como el $dsSO_2$, O_3, y las partículas (PM). Por último, las zonas sombreadas en azul corresponden al establecimiento de áreas de controlas de emisiones para Estados Unidos y México.

3.2.2 Inventarios de emisiones

El inventario de Nacional de Emisiones (**INEM**) de contaminantes es integrado por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y comprende información de las emisiones liberadas a la atmósfera de los contaminantes clasificados como criterio: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), óxidos de azufre (SOx) y partículas con diámetro aerodinámico menor a 10 y 2.5 micrómetros (PM_{10}, $PM_{2.5}$), compuestos orgánicos volátiles (COV), amonio (NH_3), emitidos por diversas fuentes en 2011. Siendo el NOx y los COV precursores de la formación del ozono (O_3) que también es un contaminante criterio. Las emisiones del INEM están agrupadas en antropogénicas y naturales. Las emisiones antropogénicas están desagregadas en fuentes fijas (industria), fuentes de área (comercios, servicios, casas habitación), y fuentes móviles (tracto camiones, autobuses, camiones, automóviles, motocicletas, aviones, helicópteros, ferrocarriles, tranvías, embarcaciones, equipo y maquinarias).

El inventario de Nacional de Emisiones de Barcos (**INEB**) utilizado en este trabajo también se obtuvo de la SEMARNAT y se basa en el modelo Waterway Network Ship Traffic, Energy, and Environmental (STEEM, por sus siglas en inglés) desarrollado en la Universidad de Delaware (Wang et al., 2007; Endresen et al., 2005). El modelo STEEM considera el número de identificación del barco, tipo de embarcación, registro bruto, capacidad instalada y velocidades de navegación. Cabe mencionar, que el 95% de las emisiones en el dominio de modelización (Figura 2), proviene de barcos de bandera internacional. Además, los barcos que navegan dentro del dominio espacial fueron agrupados en 9 tipos incluyendo buques porta contenedores, graneleros, buque tanque, buques de carga general, buques roll-on/roll-off (RO-RO), barcos de pasajeros, de carga refrigerados, buques pesqueros y otros. El inventario se compone de las emisiones horarias de CO_2, NOx, SOx, PM, HC, CO y Carbono Negro (BC, por sus siglas en inglés) en la región de estudio, con una resolución espacial de 0. 25º x 0. 25º para el año base 2011. Esto sugiere considerar en el modelo de calidad del aire 200 x 100 celdas.

Por último, se colectaron datos sobre las emisiones de los contaminantes (COV, CO, NOx, SOx, PM_{10}, $PM_{2.5}$) en 32 puertos de México, de aquí en adelante referido como el Invenatrio de Emisiones en Puertos (**INEP**). Los datos fueron proporcionados por Eastern Research Group (ERG) en 2014 (EGR, 2014), y se basan en un reporte interno “Inventario Nacional de Emisiones de Fuentes de Área 2008” (1.10.4.1.1.1- N/D 241.03690.037). Este inventario incluye las emisiones en puerto de equipo (motores, plataformas, etc.) para manejo de carga, las emisiones de los barcos en aproximación a puerto (máquinas auxiliares, remolcadores, etc.) y por último las emisiones en puerto generadas durante la reparación y mantenimiento de los barcos, así como las correspondientes a las actividades

de carga y descarga. La figura 1, muestra la ubicación de los cuatro puertos con mayor actividad en México. Los tres inventarios de emisiones descritos fueron procesados, sincronizados espacial y temporalmente en una gran base de datos para incluirla en el modelo de calidad del aire.

3.2.3 Configuración del modelo WRF-chem

Los detalles principales de la configuración del modelo se muestran en la Tabla 3 . El modelo WRF-chem fue configurado para utilizar 35 niveles en la vertical y el tipo de suelo de acuerdo a las 24 categorías del US Geological Survey (www.usgs.gov). La Tabla 3 provee detalles generales de la configuración del modelo. También comentamos que en especial la variable SSTUPDATE=1 se consideró para representar las posibles variaciones de la temperatura del mar, dado que nuestra región incluye una basta zona sobre el mar y contempla periodos de tiempo largos. También consideramos GRID_FDDA=1 para obtener una mejor representación de las variables meteorológicas especialmente para periodos de tiempo mayores a semanas, como es el caso de nuestras simulaciones. Finalmente, los datos de meteorología que se utilizaron para alimentar el modelo fueron NCEP FNL Final Operational Global Analysis data con resolución de 1º x 1º disponibles cada 6 horas. Estos datos provienen de System of Global Data Assimilation (GDAS).

Tabla 3. Especificaciones del Modelo WRF-chem

Parámetro	**Esquema o valor**
Coordenadas	10º to 35º Norte latitud y -130º a -80º Oeste longitud
Resolución espacial	35 niveles en la vertical, con mayor resolución en las capas bajas.
Tamaño de malla	27.75 x 27.75 km, y (200 x 100) celdas.
Capa Límite de Frontera	Esquema YSU
Opción física	Esquema Microphysics WRF Single-Moment 5-class
Opcion de tipo de nube	Grell 3D ensamble scheme
Esquema de radiación	Rapid Radiative Transfer Model (RRTM) and Goddard Surface layer Monin–Obhukov similarity Model and FTUV photolysis
Emisiones biogénicas.	Online Gunther scheme
Emisiones antropogénicas.	RADM2 Chemical mechanism y MADE/SORGAM aerosols

La Figura 3 muestra un esquema de las etapas del proceso de modelización de calidad del aire. La primera es el llamado pre procesamiento (WPS) de datos. Ahí se interpolan horizontalmente los datos de topografía, de manera consistente con el dominio espacial y al mismo tiempo se interpolan los datos meteorológicos. Los datos son integrados usando la función metrgid.exe y se genera un archivo (met_em_d01_20190101.nc) por cada paso temporal preseleccionado desde el tiempo inicial hasta el tiempo final. En la segunda etapa (WRF-chem) los datos generados en la etapa WPS se interpolan verticalmente, usando la función real.exe, y se generan archivos de datos wrfbdy y wrfinput, que contienen las condiciones de frontera e iniciales respectivamente. Al mismo tiempo se incluyen las

emisiones de contaminantes de acuerdo al mecanismo químico (conjunto de reacciones) integrado en al modelo, en nuestro caso empleamos un mecanismo químico llamado Regional Acid Deposition model (RADM-2) que contiene 156 reacciones y 51 especies químicas (Stockwell et al., 1990). Las emisiones en tierra se colocaron en la primera capa en la vertical, excepto por algunas fuentes puntuales que dependiendo de su altura pudieron ser colocadas en los siguientes niveles en la altura. Las emisiones de los barcos fueron colocadas en aproximadamente 12 m sobre el nivel del mar, por esta razón aparecen en el segundo nivel del modelo.

El modelo se ejecuta con la función wrf.exe y se generan archivos de salida wrfout_d01.nc uno por cada paso temporal de salida del modelo. Estos archivos contienen los datos de concentraciones de cada contaminante y datos de variables meteorológicas. Finalmente, en la última etapa (Post), los resultados son verificados, al comparar con mediciones. Se emplean herramientas de visualización y geo procesamiento (Mora-Ramirez et al.,2012; García et al.,2017).

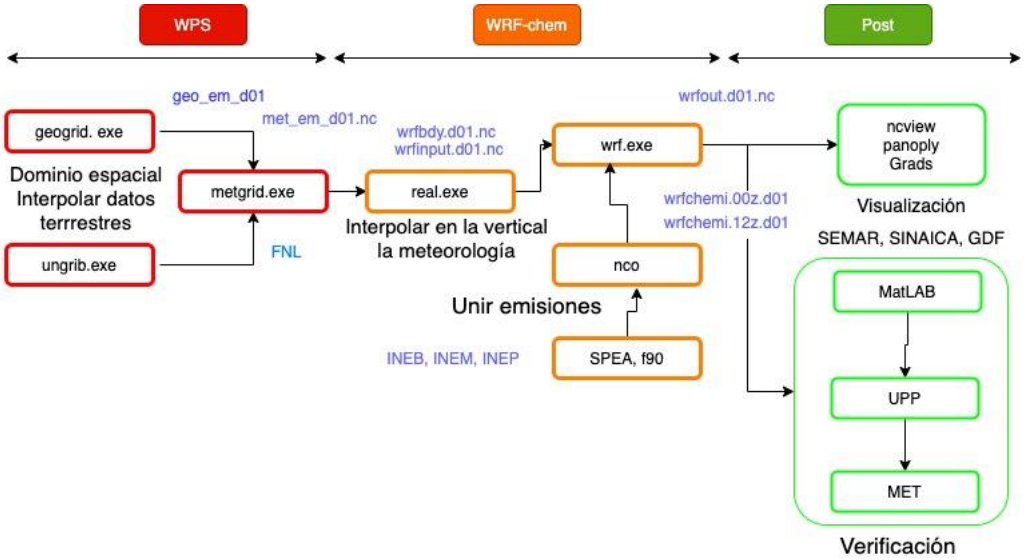

Figura 3. Etapas del proceso de modelización de la calidad del aire con WRF-chem

Es importante mencionar que la configuración del original del modelo WRF-chem no considera el cálculo de $dsSO_2$, razón por la cual el modelo WRF-chem se reconfiguró siguiendo la propuesta de (Grell et al., 2005). Para verificar que los cálculos del $dsSO_2$ tuvieran sentido, y hasta donde sabemos, en la región de estudio no se cuenta con datos sobre depósito de azufre, se compararon los resultados del modelo con estudios en otras partes del mundo.

3.3 Correlación de $dsSO_2$ y rendimiento de cultivos.

Para analizar los datos de concentración de $dsSO_2$ obtenidos en el dominio geográfico previamente definido, construimos un mapa del depósito seco de $dsSO_2$ a nivel municipal. Los datos de salida del modelo WRF-chem se obtuvieron en el sistema de coordenadas WGS84, sin embargo, para su procesamiento fue necesario realizar un ajuste espacial a través de un método afinado de ajuste espacial SIG, para que coincida completamente con la cartografía disponible (INEGI, 2018) en el mismo sistema de coordenadas geográficas donde tenemos los datos de rendimientos agrícolas. Posteriormente, se utilizó la herramienta de análisis espacial de estadísticas zonales (estadísticas zonales como tabla) para obtener los valores máximos, mínimos, promedio, rango y desviación estándar de $dsSO_2$ por municipio derivados de los datos de origen en formato ráster y vincularlos a formato vectorial de la división política administrativa municipal, luego desglosado en concentraciones por hectárea en cada municipio (kg ha^{-1} $año^{-1}$). Como parte de la metodología se propuso la identificación de estas concentraciones a nivel municipal para permitir las evaluaciones correspondientes de los datos de dióxido de azufre con las variables de producción agrícola emitidas por las fuentes oficiales (SIAP, 2018) a nivel municipal, que es la mejor desagregación espacial disponible en México. La información ofrecida es sobre superficie sembrada, superficie cosechada y valor de la producción, para cultivos cíclicos y perennes y por modalidad hídrica. Los reportes comprenden a las 32 entidades federativas del país y presentan la información a nivel nacional, estatal, distrital y municipal.

Para identificar las posibles vinculaciones entre el depósito seco de $dsSO_2$ y los comportamientos de los cultivos (rendimientos), se realizó análisis comparativo de la evolución de los cultivos seleccionados en el período 2003-2017. Donde se analizan las variaciones de los promedios registrados en las siguientes variables: superficie sembrada (ha), superficie cosechada, como porcentaje de la superficie sembrada (%), y rendimientos (Ton·ha^{-1}). La evaluación directa de la superficie siniestrada ha quedado excluida de este trabajo puesto que hace referencia principalmente a los daños causados por fenómenos extremos (geo-hidro-meteorológicos) y podría causar distorsiones en la valoración de los resultados. Se conforman dos universos de comparación; el que refleja los promedios de toda la producción nacional para cada cultivo y aquel en el que solamente están presentes los promedios de la producción agrícola de los municipios con valores de $dsSO_2 > 0$ (10^{-8} Ton ha^{-1} $año^{-1}$) y esto define lo que denominamos el área afectada (AA). Así mismo con propósito de corroborar evidencia cuantitativa de vinculación entre las concentraciones de $dsSO_2$ por municipio y las tendencias de los cultivos se calculan los valores del coeficiente de correlación de pearson

$$R = \frac{N\sum xy-(\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[N\sum x^2-(\sum x)^2]}\cdot\sqrt{[N\sum y^2-(\sum y)^2]}} \quad (1)$$

donde N corresponde al número de observaciones (municipios) del cultivo en cuestión, x es el rendimiento (Ton ha^{-1} $año^{-1}$), el valor promedio del depósito seco de $dsSO_2$ es representado en la variable y (Ton ha^{-1} $año^{-1}$). Así mismo, empleamos un modelo de regresión lineal simple

$$y = mx + b \quad (2)$$

donde *m* corresponde a la pendiente de la línea ajustada y *b* es el término independiente de la ecuación, ambos parámetros se ajustan de acuerdo a

$$m = \frac{N\cdot(\sum xy)-(\sum x)(\sum y)}{N\cdot(\sum x^2)-(\sum x)^2} \quad (3)$$

$$b = \frac{(\sum y)(\sum x^2)-(\sum x)(\sum xy)}{N\cdot(\sum x^2)-(\sum x^2)} \quad (4)$$

Es importante señalar que **el análisis de correlación se enfoca en el área agrícola cosechada** en lugar de toda el área sembrada para disminuir la distorsión potencial de los rendimientos si se incluye el área de cultivo afectada por fenómenos hidrometeorológicos extremos. Si bien es cierto que ambas herramientas estadísticas no establecen una relación causal, serían útiles para discriminar donde no existe un vínculo, dentro de este marco, entre el comportamiento de los cultivos seleccionados y los depósitos secos de $dsSO_2$.

También, con la intención de fortalecer la confiabilidad de los resultados es la consideración del valor P en el análisis de datos estadísticos. La probabilidad de resultados aleatorios se estableció en 0.05 (5%), por lo tanto, aquellos cultivos con valores de P más bajos refuerzan la hipótesis alternativa, la que afirma la correlación entre las concentraciones de $dsSO_2$ y el comportamiento del rendimiento de los cultivos. Además de la consideración de la temporalidad de los cultivos (cíclico o perenne), cada correlación de cultivos se realizó por separado de acuerdo con las prácticas agrícolas; modalidades de riego por temporal o de irrigación. Con esto se pretende buscar una posible correlación del impacto del riego en los resultados.

Finalmente, a partir de los cultivos correlacionados resultantes, se realizó un análisis detallado de los rendimientos promedio estableciendo 3 grupos de comparación territorial: el primer grupo compuesto por el *área afectada* (**AA**), y el segundo por los municipios con los *valores más altos de* $dsSO_2$, en este el número de municipios varió de acuerdo con las observaciones registradas en 2011 y el uso del método de rupturas naturales, que se empleó con la ayuda de un SIG, las concentraciones de $dsSO_2$

se dividieron en clases cuyos límites se establecieron donde había diferencias relativamente grandes en el valores de datos, considerando la primera o las dos primeras clases. El tercer grupo de comparación de rendimientos promedio fue todo *el territorio nacional*.

4. RESULTADOS

4.1 Inventarios de Emisiones en Tierra, Mar y Puertos.

La Tabla 4 muestra un resumen de los datos del Inventario Nacional de Emisiones 2011 (INEM-2011), que se encontró desagregado por tipo de fuente: móvil, puntual y área que hay en Tierra.

Tabla 4. Inventario de emisiones en Tierra 2011 (Ton/año)

	PM_{10}	**$PM_{2.5}$**	**SO2**	**CO**	**NO_X**	**VOC**	**NH_3**	**BC**
Puntuales	221,125	139,580	2,516,007	1,045,559	550,389	297,592	23,794	13,905
Área	683,044	481,874	31,140	3,613,412	331,982	3,301,921	1,049,201	51,902
Móvil	57,206	48,541	73,017	54,765,437	2,982,866	4,949,249	40,009	11,863
Total	961,376	669,997	2,620,165	59,424,408	3,865,238	8,548,763	1,113,006	77,671

La Tabla 5 muestra un resumen del Inventario Nacional de Emisiones de Barcos (INEB-2011) que incluye datos de las emisiones de barcos que navegan en el dominio espacial.

Tabla 5. Resumen de Inventario de emisiones de barcos 2011 (Toneladas Métricas / año)

CO_2	**NOx**	**SOx**	**PM**	**BC**	**CO**	**HC**
9,521,700	25,865,000	3,001,000	423,000	12,000	2,128,000	912,000

Finalmente, la Tabla 6 muestra los datos del Inventario Nacional de Emisiones en Puerto (INEP-2011), y considera las emisiones de algunos contaminantes atmosféricos en los 5 principales puertos de México.

Tabla 6. Emisiones en puertos principales de México

	Emisiones (Toneladas Métricas /año)					
Puerto	**COV**	**CO**	**NOx**	**SOx**	**PM_{10}**	**$PM_{2.5}$**
Manzanillo	252	1665.0	6342.6	3434.7	499.1	437.3
Altamira	114.1	854.9	2749.1	1475.3	216.5	187.1
Veracruz	2538.0	6822.8	75501.0	42788.9	5924.5	5446.3
Tampico	451.6	1440.1	13168.7	7429.1	1033.7	954.3
Coatzacoalcos	139.9	1614.5	2702.7	1344.9	213.8	169.6

4.2 Inventarios de Emisiones para WRF-chem

Las emisiones de los inventarios (INEM, INEB e INEP) fueron procesadas para servir como entrada al modelo WRF-chem. Este proceso incluye la geolocalización, la distribución temporal de las emisiones, y el desagregar químicamente las especies de acuerdo al mecanismo químico de reacción (RADM2) del modelo WRF-chem. La Figura 4 muestra un ejemplo de las emisiones de SO_2 a las

12:00 horas en el dominio de modelización en (a) la superficie y (b) en el segundo nivel en la vertical (~12 msnm.) donde se aprecian las emisiones de los barcos y algunas fuentes puntuales que corresponden a chimeneas altas.

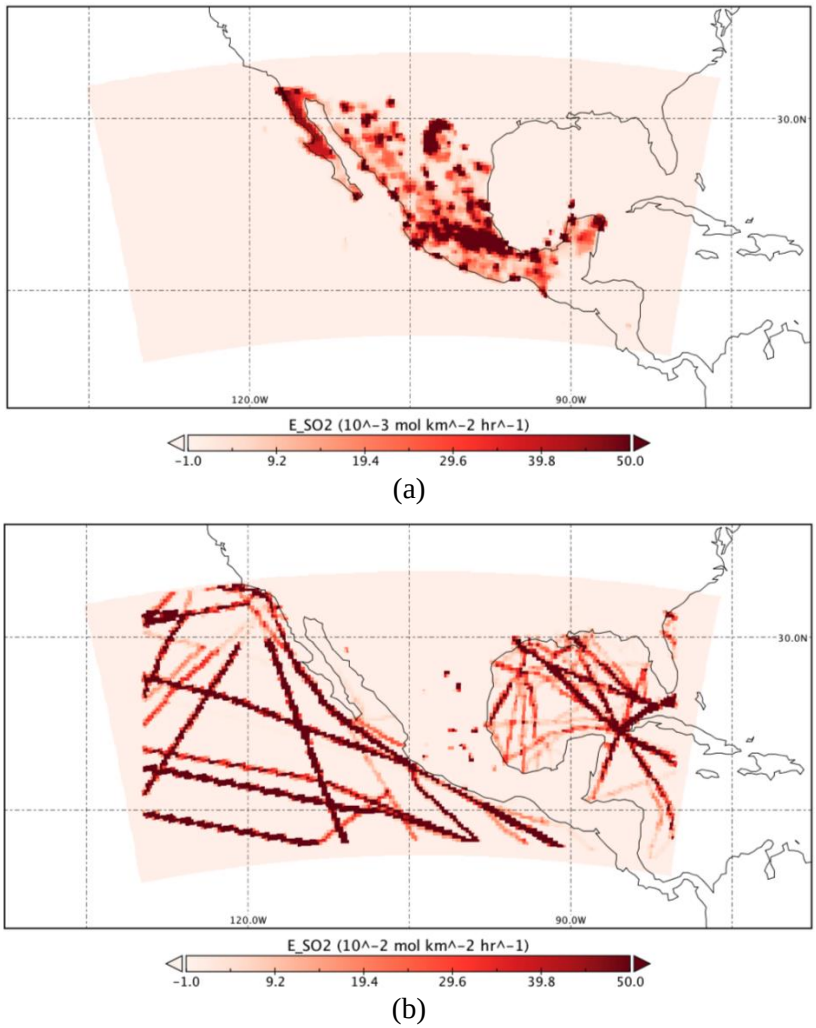

Figura 4. Emisiones de SO_2 (Ton ha^{-1} $año^{-1}$) a las 12:00 h en el dominio de modelización en (a) la superficie y (b) a una altura aproximada de 12 m sobre el nivel del mar.

4.3 Depósito seco de SO_2 por municipio.

Como resultado de la modelización de calidad del aire con WRF-chem, se obtuvo el depósito seco anual en 2011. La Figura 5 muestra que el $dsSO_2$ se observó prácticamente en todo el territorio nacional, con un total de 396.87 Ton $año^{-1}$ en la parte terrestre, afectando un área de 1,754,626.7 km^2 equivalente al 89% del total del territorio nacional.

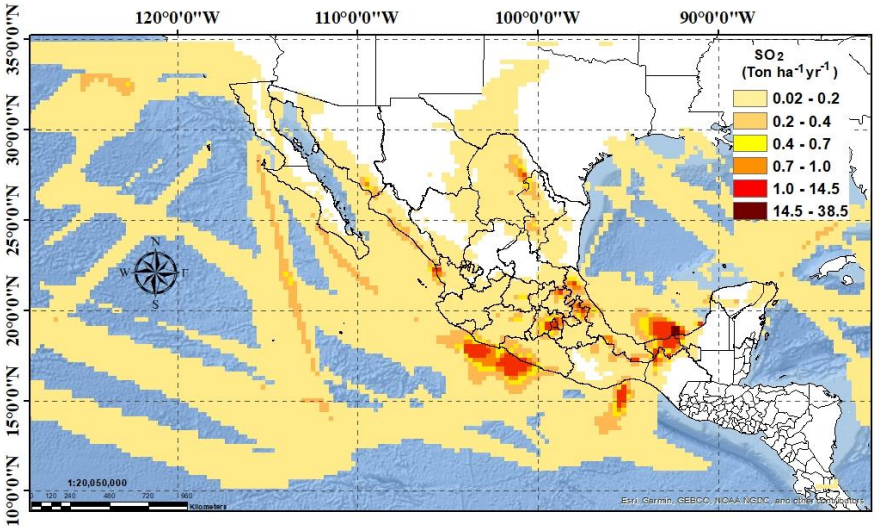

Figura 5. Depósito seco anual de SO_2 (Ton ha^{-1} $año^{-1}$) en México 2011, como resultado de la modelización con WRF-chem.

La Figura 6 muestra la distribución espacial de los valores (a) medios, (b) máximos, y (c) mínimos de $dsSO_2$ (Ton ha^{-1} $año^{-1}$) por municipio en el año 2011.

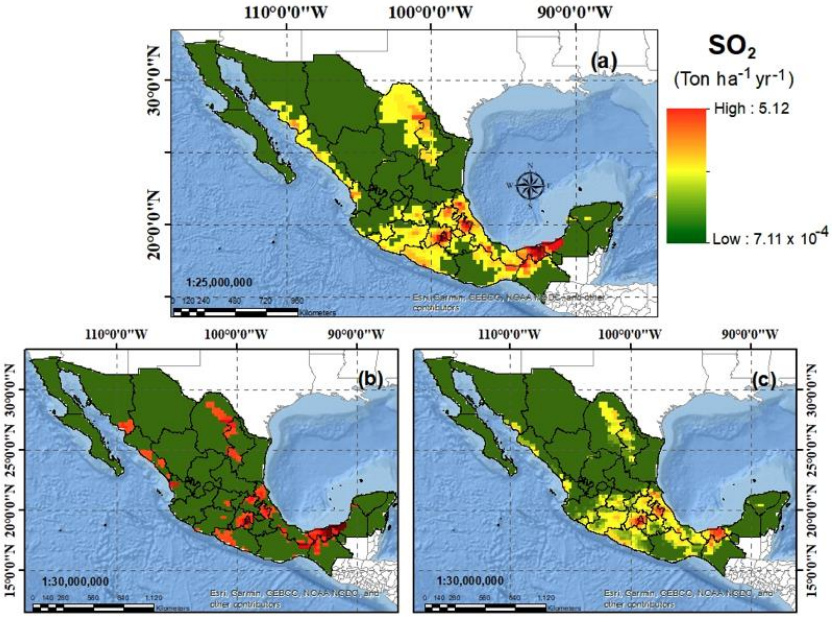

Figura 6. Distribución espacial de los valores (a) medios, (b) máximos y (c) mínimos del $dsSO_2$ (Ton ha^{-1} $año^{-1}$) por municipio en México 2011, utilizando la herramienta estadística zonal como tabla en ArcGIS.

Los valores medios del $dsSO_2$ se aprecian en las zonas costeras del país. En la llanura costera del Océano Pacifico, que incluye el sur-oeste de Sonora, Sinaloa, Nayarit, Colima, Michoacán y Guerrero, se presentan valores medios de depósito seco de azufre. Este se explica principalmente por

la presencia de barcos, de todas las banderas de nación, que navegan en la ruta hacia el canal de Panamá. Estas emisiones llegan a tierra, pero no pueden introducirse más, debido a la barrera natural que conforma la Sierra Madre Occidental, y una parte del Sistema Volcánico Transversal. Así mismo los barcos son causantes también de una buena parte del $dsSO_2$ observado en los Estados que colindan con el Golfo de México: Veracruz, Tabasco y Campeche. Similar al caso de las emisiones en el Pacífico, las emisiones generadas en el Golfo de México se introducen tierra adentro, hasta que se encuentran con el Sistema Volcánico Transversal y/o la Sierra Madre Oriental. Cabe resaltar que el valor máximo de $dsSO_2$ se encontró en el Estado de Campeche, y este se atribuye a la actividad petrolera de las plataformas. Por otra parte, observamos también, que las zonas de la megalópolis central de México, conformada por Tlaxcala, Morelos, Puebla, Ciudad de México, Estado de México e Hidalgo), así como la Zona Metropolitana de Monterrey (ZMM), presentan $dsSO_2$ significativo, que se explica por las emisiones generadas por la actividad industrial de estas grandes urbes. En resumen, el **50.4% del $dsSO_2$ se concentra en 10 municipios**, que en orden descendente son: Ciudad del Carmen, Balancán, Candelaria, Palizada, Tenosique y Palenque; tres del estado de Campeche, dos de Tabasco y uno de Chiapas.

Por otra parte, hasta donde sabemos no existen mediciones en superficie $dsSO_2$ en México. Así que, con la intención de ganar confianza en la calidad de los resultados, buscamos en la literatura estudios similares en otras regiones del planeta y comparamos con los nuestros resultados. La Figura 7. Valores medios del dsSO2 en diversas regiones del mundo incluyendo nuestros resultados. Así mismo, se muestra el valor máximo de depósito seco de azufre (~39 Ton ha-1 año-1)., muestra el valor promedio de depósito seco de azufre en diversas regiones del mundo, estos varían entre 2×10^{-2} a 10×10^{-2} Ton ha^{-1} $año^{-1}$, que es consistente con nuestro valor promedio estimado de 5.5×10^{-2} Ton ha^{-1} $año^{-1}$. Así mismo el máximo de $dsSO_2$ (~39 Ton ha^{-1} $año^{-1}$) observado en Campeche se encontró en el mismo orden de magnitud que los valores medidos cerca de una planta de Ácido Sulfúrico (H_2SO_4) en Argelia (Ali Khodja et al., 1998).

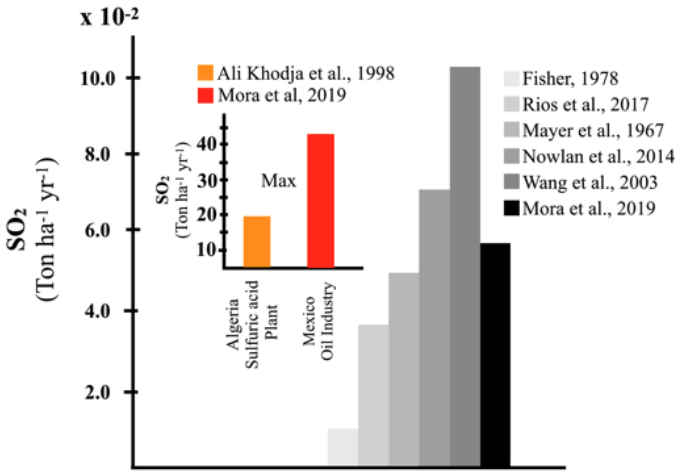

Figura 7. Valores medios del $dsSO_2$ en diversas regiones del mundo incluyendo nuestros resultados. Así mismo, se muestra el valor máximo de depósito seco de azufre (~39 Ton ha^{-1} $año^{-1}$).

4.4 Bases de datos de agricultura

Se encontró información estadística sobre la producción de la agricultura en México en forma anual para 550 productos, y sobre el avance mensual de siembras y cosechas para 64 productos estratégicos del campo. La Tabla 7 muestra un ejemplo de algunos datos que emplearemos para realizar este estudio.

Tabla 7. Resumen de datos del SIAP para algunos cultivos con correlación con el $dsSO_2$

Cultivo	Sembrada	Cosechada	Volumen Producción	Rendimiento	Estados de mayor producción
Avena forrajera en verde	552210.3	395675.2	3958610.8	17302.8	Edo de México, Michoacán y Tlaxcala
Calabaza	7538	7213.5	137981.2	1323.1	Sonora, Nayarit y Michoacán
Melón	21146	20617	556026.8	4299.4	Guerrero, Oaxaca y Yucatán
Trigo grano	714864.1	662221.3	3627510.8	1832.11	Oaxaca, Michoacán y Puebla
Uva	27830.8	27209.7	281144.9	4769	Zacatecas, Aguascalientes y Baja California

4.5 Correlación de rendimiento con $dsSO_2$

La superficie sembrada de cultivos con cualquier cantidad de $dsSO_2$, se denominará el área de estudio (AE), como ya se ha mencionado contiene 1036 municipios, que ocupan un área de 1,754,626.7 km^2 equivalente al 89% del total del territorio nacional.

La superficie (ha) sembrada de cultivos con cierto grado de influencia por depósito de azufre se muestra en la Tabla 8, esta combina la base de datos del Servicio de Información Agroalimentaria y

Pesquera (SIAP) con las zonas donde hay $dsSO_2$. Podemos apreciar que los cultivos con mayor proporción de exposición respecto del total nacional son níspero, avena forrajera verde, frijol, maíz, plátano y alfalfa.

Tabla 8. Superficie de cultivos 2017 en municipios con depósito de $dsSO_2$

Cultivo	Superficie sembrada en AE (ha)	Proporción respecto del total nacional (%)	Sensibilidad al DS-SO2	Tipo
Acelga	246.87	27.7	Sensible	Cíclico
Alfalfa achicalada	31,549.00	21.6	Sensible	Perenne
Alfalfa verde	136,632.11	57.0	Sensible	Perenne
Arvejón	494.95	34.1	Sensible	Cíclico
Avena forrajera achicalada*	16420	50.6	Sensible	Cíclico
Avena forrajera seca*	7698.58	54.1	Sensible	Cíclico
Avena forrajera verde	497,709.95	78.9	Sensible	Cíclico
Avena grano	32,549.60	75.1	Sensible	Cíclico
Calabacita	10,903.70	37.2	Resistente	Cíclico
Calabaza	1,403.76	17.5	Resistente	Cíclico
Cebada forrajera en verde	12,634.20	67.9	Sensible	Cíclico
Cebada grano	186,159.15	51.5	Sensible	Cíclico
Ciruela	10,114.24	67.0	Sensible	Perenne
Frijol	1,437,526.84	85.8	Sensible	Cíclico
Haba grano	5,836.45	28.0	Sensible	Cíclico
Haba verde	3,543.44	30.5	Sensible	Cíclico
Maíz forrajera en verde	438,742.89	74.3	Resistente	Cíclico
Maíz grano	4,893,709.09	64.9	Resistente	Cíclico
Melón	10,133.45	51.6	Resistente	Cíclico
Níspero	11.99	85.7	Sensible	Perenne
Nuez	38,583.15	31.3	Sensible	Perenne
Pepino	9,953.53	49.3	Resistente	Cíclico
Plátano	55,540.06	69.2	Sensible	Perenne
Trigo grano	195,982.65	29.6	Sensible	Cíclico
Uva	7,395.08	21.9	Sensible	Perenne
Zanahoria	6,790.88	59.0	Sensible	Cíclico

*Datos disponibles de 2012, fuente: elaboración propia con datos del SIAP, 2018

Con base en los datos de SIAP 2011 y $dsSO_2$ a nivel municipal para el mismo año, podemos estudiar que tanta influencia tiene el depósito de azufre sobre los rendimientos de los cultivos. Analizamos el valor del coeficiente de correlación (R) para diferentes cultivos. Entendiendo que los cultivos con $R > 0$ deberían aumentar su rendimiento a medida que aumentan las concentraciones $dsSO_2$ depositado en el suelo, y que, en caso contrario, cuando $R < 0$, se espera que un mayor $dsSO_2$ pudiera reducir el

rendimiento de los cultivos. La Tabla 9 muestra los valores del coeficiente de correlación (R) para diversos cultivos. Los cultivos con mayor correlación positiva fueron el forraje de cebada (R = 93.8) y la zanahoria (R = 81.7) en la modalidad de temporal, y el forraje de cebada verde (R = 67.9) en la modalidad del riego. A su vez, los cultivos con mayor correlación negativa (anti-correlación) fueron el melón (R = -69.7), la alfalfa de forraje verde (R = -65.5) en la modalidad de temporal, mientras que en la modalidad de riego se encontró únicamente el haba (R = -59.3). Así mismo, los resultados de la Tabla 9 siguieren que en general los coeficientes de correlación de los cultivos de riego son menores que los coeficientes de correlación de los cultivos de temporal.

Tabla 9. Coeficiente de correlación entre el depósito de $dsSO_2$ y el rendimiento de cultivos en 2011

		Temporal		**Riego**	
Tipo	**Cultivo**	R	R^2	R	R^2
P	Alfalfa fodder (green)	**-65.5**	42.9	-0.85	0
P	Plum	-22.4	5	-6.7	0.5
P	Nut	-9.7	0.9	4.3	0.18
P	Banana	-0.1	0	16.6	2.8
P	Grape	--	--	36.6	13.4
C	Dry peas	-36.0	13	--	--
C	Oat fodder (dry)	53.4	28.6	-19.2	3.7
C	Oat fodder (green)	13.9	1.9	32.8	10.8
C	Oat (grain)	3	0.9	-50.2	25.2
C	Zucchini	-21.7	4.7	-19.5	3.8
C	Pumpkin	-25.3	6.4	-23.2	5.4
C	Barley fodder (dry)	**93.8**	88	--	--
C	Barley fodder (green)	36.6	13.4	**67.9**	46.1
C	Barley (grain)	-6.7	0.5	-26.4	7
C	Bean	2.5	0	7.8	0.6
C	Fava bean	-11.6	1.4	**-59.3**	35.2
C	Fava (green)	23.3	5.4	5.7	0.33
C	Corn fodder (green)	28.7	8.2	22.4	5
C	Corn (grain)	-1.8	0.03	2.1	0.005
C	Melon	**-69.7**	48.6	4.2	0.18
C	Cucumber	28.8	8.3	-5.6	0.32
C	Wheat (grain)	4.4	0.19	4.9	0.24
C	Carrot	**81.7**	66.7	-15.2	2.3

Las tablas 10 – 12 muestran los rendimientos de varios cultivos a nivel nacional (Nac), en el Área de Estudio (AE) y sus diferencias.

Tabla 10. (a) Rendimientos de cultivos

Cultivo	**Nac (T/ha)**	**AE (T/ha)**	**AE-Nac (T/ha)**	**AE-N (%)**
Plátano	28.858	26.080	-2.778	**-0.096**
Ciruela	4.857	4.757	-0.101	-0.021
Níspero	4.828	5.293	0.465	**0.096**
Nuez	1.493	1.439	-0.053	-0.036

Alfalfa achicalada	15.084	13.834	-1.250	-0.083
Alfalfa verde	80.655	78.474	-2.181	-0.027
Uva	11.427	8.886	-2.541	**-0.222**

Tabla 11. Rendimientos de cultivos

Cultivo	Nac (T/ha)	AE (T/ha)	AE-Nac (T/ha)	AE-Nac (%)
Calabacita	16.4	16.4	0.1	0.005
Calabaza	16.0	11.5	-4.5	**-0.281**
Maíz grano	3.2	3.3	0.1	0.035
Melón	26.9	26.1	-0.8	-0.028
Pepino	34.6	32.5	-2.1	-0.060
Zanahoria	26.6	27.7	1.1	0.041

Tabla 12. Rendimiento de cultivos

Cultivo	Nac (T/ha)	AE (T/ha)	AE-Nac (T/ha)	AE-Nac (%)
Acelga	10.91	10.56	-0.35	-0.03
Arvejón	1.23	1.22	0.00	0.00
Avena forrajera achicalada*	3.00	2.78	-0.22	-0.07
Avena forrajera verde	13.77	11.99	-1.78	**-0.13**
Avena grano	1.71	1.65	-0.06	-0.03
Cebada forrajera en verde	17.33	15.29	-2.04	-0.12
Cebada grano	2.58	2.72	0.13	0.05
Frijol	0.72	0.71	-0.01	-0.01
Haba grano	1.17	1.13	-0.04	-0.03
Haba verde	5.91	5.39	-0.53	-0.09
Trigo grano	5.09	3.92	-1.17	**-0.23**

Hasta ahora nos hemos concentrado en analizar el rendimiento de los cultivos ubicados en las zonas con presencia de $dsSO_2$. Sin embargo, con el objetivo de ser más específicos, hemos seleccionado un valor criterio para el depósito de azufre, para distinguir las zonas de país con mayores cantidades de $dsSO_2$. Los resultados de este análisis se muestran en la Figura 8, los cultivos sensibles como el melón, ciruela, avena grano disminuyen su rendimiento (13-58% respecto al nacional) en las zonas con valores de $dsSO_2$ mayores al valor crítico. En cambio, los cultivos clasificados como resistentes como la avena seca, cebada seca, cebada verde, maíz forrajero verde y la uva, mejoran sus rendimientos.

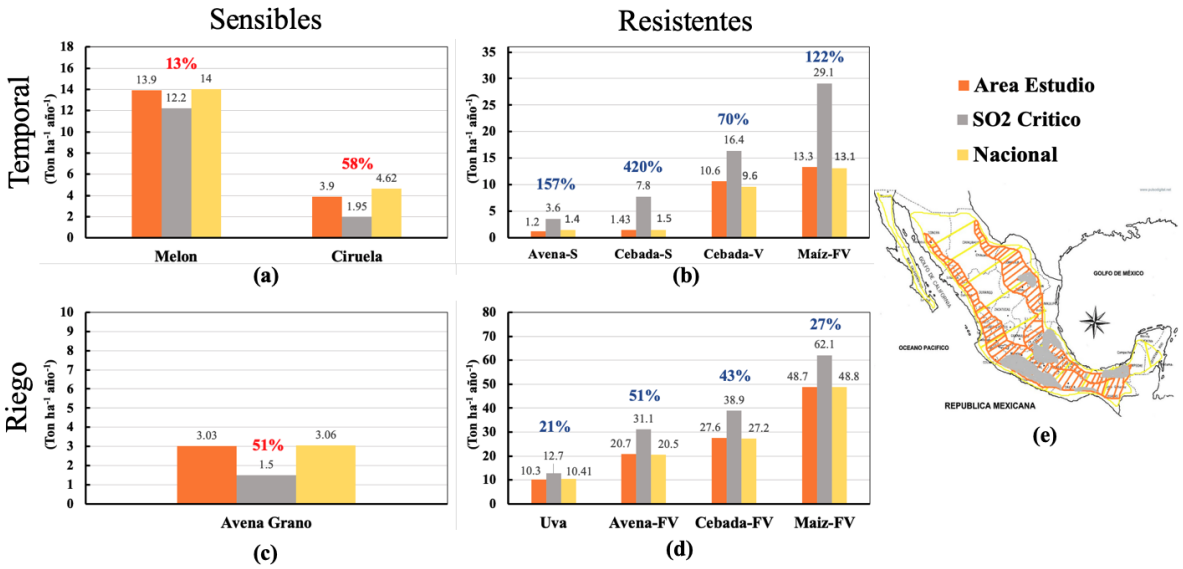

Figura 8. Análisis de los cultivos con buena correlación entre el $dsSO_2$ y los rendimientos de acuerdo al tipo de técnica (riego y temporal) y su clasificación (sensibles o resistentes).

5. CONCLUSIONES

Se investigó sobre la correlación entre el $dsSO_2$ y los rendimientos agrícolas de diversos cultivos en México. Los resultados de las simulaciones numéricas de calidad del aire que obtuvimos muestran que en más del 80% del territorio nacional se encuentran valores de $dsSO_2$. Se identificaron cuatro zonas donde las concentraciones de $dsSO_2$ rebasan los niveles críticos para la vegetación, (i) en el Pacífico se encuentra afectada la región sur-oeste de Sonora, Sinaloa, Nayarit, Colima, Michoacán y Guerrero, que se explica principalmente por las emisiones de grandes barcos que navegan en el Pacífico hacia el canal de Panamá, (ii) en el noreste tenemos a Nuevo León y una fracción de Coahuila, influenciadas principalmente por la actividad industrial y las emisiones generadas por las actividades propias de estas ciudades, (iii) caso similar al de la Megalópolis central del México (Edo. de México Morelos, Tlaxcala, CDMX y Puebla), y finalmente (iv) en el la región del Golfo de México, encontramos los máximos de depósitos de azufre en los estados de Veracruz, Tabasco y Campeche, que se atribuyen a la sinergia de las emisiones generadas por los barcos y su actividad en el Golfo de México, junto con las emisiones de la industria petrolera. Siendo esta última la fuente de $dsSO_2$ mas importante en el país. Así mismo, a partir de la estimación de los datos de $dsSO_2$ por municipio en México, se investigó la correlación del $dsSO_2$ con el rendimiento de diferentes cultivos a nivel municipal. Los resultados preliminares, muestran que varios de los cultivos sensibles disminuyeron su rendimiento sin distinción del tipo de producción (riego o temporal). Por otro lado, en los cultivos resistentes (avena, uva, cebada y maíz forrajero verde) se observó un aumento en el rendimiento para aquellos municipios con mayores depósitos de azufre respecto al promedio nacional.

BIBLIOGRAFÍA

Abdulla, A., & Linden, O. (2008). Maritime traffic effects on biodiversity in the Mediterranean Sea. Volume 1 - Review of impacts, priority areas and mitigation measures.

Adaros G. et al., Concurrent exposure to SO2 and/or NO2 alters growth and yield responses of wheat and barley to low concentrations of O3. New phytologist, 118: 581–591 (1991).

Ali-Khodja, H., & Kebabi, B. (1998). Assessment of wet and dry deposition of SO_2 attributable to a sulfuric acid plant at Annaba, Algeria. Environment International, 24(7), 799–807. https://doi.org/10.1016/S0160-4120(98)00059-2

Ashmore, M.R et al., Effects of ambient air pollution on crop species in and around London. In: Mathy, P. ed. Air pollution and ecosystems. Dordrecht, D. Reidel, 1988, pp. 641–646.

Ashmore, M.R., Wilson, R.B. (Eds.), 1993. Critical levels of Air Pollutants for Europe. Background Papers prepared for the ECE Workshop on critical levels, Egham, UK, 23-26 March 1992.

Astolfi, S., Zuchi, S., & Passera, C. (2004). Role of sulphur availability on cadmium-induced changes of nitrogen and sulphur metabolism in maize (Zea mays L.) leaves. Journal of Plant Physiology. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2003.11.005

Badr, O., & Probert, S. D. (1994). Atmospheric sulphur: Trends, sources, sinks and environmental impacts. Applied Energy. https://doi.org/10.1016/0306-2619(94)90030-2

Baumgardner, R. E., Lavery, T. F., Rogers, C. M., & Isil, S. S. (2002). Estimates of the atmospheric deposition of sulfur and nitrogen species: Clean Air Status and Trends Network, 1990-2000. Environmental Science and Technology. https://doi.org/10.1021/es011146g

Bell, J. N. B., & Treshow, M. (2002). *Air pollution and plant life*. John Wiley & Sons.

Bouman, E. A., Lindstad, E., Rialland, A. I., & Strømman, A. H. (2017). State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. Transportation Research Part D: Transport and Environment. https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.03.022

Cape, J. N., Direct damage to vegetation caused by acid rain and polluted cloud: definition of critical levels for forest trees. Environmental pollution, 82: 167–180 (1993).

Chang, J. C., & Hanna, S. R. (2004). Air quality model performance evaluation. Meteorology and Atmospheric Physics. https://doi.org/10.1007/s00703-003-0070-7

Colls, J. J. et al., Use of a field release system to distinguish the effects of dose and concentration of sulfur dioxide on winter barley. Agriculture, ecosystems and environment, 38: 3–10 (1992).

Daly, A., & Zannetti, P. (2007). Air Pollution Modeling – An Overview. Ambient Air Pollution.

Dijkshoorn, W., & van Wijk, A. L. (1967). The sulphur requirements of plants as evidenced by the

sulphur-nitrogen ratio in the organic matter a review of published data. Plant and Soil. https://doi.org/10.1007/BF01978680

Dubey, S. (2013). Acid Rain-The Major Cause of Pollution: Its Causes, Effects and Solution. International Journal of Scientific Engineering and Technology.

Endresen, Ø., Bakke, J., Sørgård, E., Berglen, T. F., & Holmvang, P. (2005). Improved modelling of ship SO2 emissions - A fuel-based approach. Atmospheric Environment. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.02.041

Fields, R. Physiological responses of lichens to air pollutant fumigations. In: Nash, T.H. & Wirth, V., ed. Lichens, bryophytes and air quality. Berlin, Cramer, 1988, pp. 175–200.

Fowler D. et al,. Effects of air filtration at small SO2 and NO2 concentrations on the yield of barley. Environmental pollution, 53: 135–150 (1988).

Gao, M., Carmichael, G. R., Wang, Y., Saide, P. E., Yu, M., Xin, J., … Wang, Z. (2016). Modeling study of the 2010 regional haze event in the North China Plain. Atmospheric Chemistry and Physics. https://doi.org/10.5194/acp-16-1673-2016

García Reynoso, J. A., & Mora-Ramírez, M. A. (2017). Implementation of the Unified Post Processor (UPP) and the Model Evaluation Tools (MET) for WRF-chem evaluation performance. Atmósfera, 30(3), 259–273. https://doi.org/10.20937/ATM.2017.30.03.06

Garsed, S. G., Rutter, A.J. Relative performance of conifer populations in various tests for sensitivity to SO2, and the implications for planting trees in polluted areas. New phytologist, 92: 349–67 (1982).

Grell, G. A., Peckham, S. E., Schmitz, R., McKeen, S. A., Frost, G., Skamarock, W. C., & Eder, B. (2005). Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. Atmospheric Environment. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.04.027

Hawksworth, D.L., Rose E, F. Qualitative scale for estimating SO2 air pollution in England and Wales using epiphytic lichens. Nature, 227: 145–148 (1970).

Hell, R. (2004). Sulphur in Plants. Plant Science. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2003.11.010

Jager, H. J. et al., Effects of air pollution on agricultural crops in Europe. Proceedings of the Final Symposium of the European Open-Top Chamber Project, Tervuren, 1992. Brussels, Commission of the European Communities, 1993 (Air Pollution Report, No. 46).

Kalaji, H. M., Oukarroum, A., Alexandrov, V., Kouzmanova, M., Brestic, M., Zivcak, M., … Goltsev, V. (2014). Identification of nutrient deficiency in maize and tomato plants by invivo chlorophyll a fluorescence measurements. Plant Physiology and Biochemistry. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.03.029

Khan, M. R., & Khan, M. M. (2011). Plants response to diseases in sulphur dioxide stressed

environment. *Plant Pathology Journal*, *10*(1), 1–12. https://doi.org/10.3923/ppj.2011.1.12

Kiriazids, T., & Kiriazidis, T. (2018). Maritime transport. In European Transport: Problems and Policies. https://doi.org/10.4324/9780429447693-5

Mathot, M., Thélier-Huché, L., & Lambert, R. (2009). Sulphur and nitrogen content as sulphur deficiency indicator for grasses. European Journal of Agronomy. https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.09.004

Matsushima et al., Effects of ambient low SO2 level in the industrial area on growth of Japanese black pine trees and citrus seedlings. Report of the environmental science of Mie University, 13: 73–80 (1989).

Mora-Ramirez M. A. and Agustin R. García, Evaluation of WRF-chem simulations with the Unified Post Processor (UPP) and Model Evaluation tools (MET). 11th annual CMAS conference, Chapel hill, NC, October 15-17, 2012.

Nowlan, C. R., Martin, R. V., Philip, S., Lamsal, L. N., Krotkov, N. A., Marais, E. A., … Zhang, Q. (2014). Global dry deposition of nitrogen dioxide and sulfur dioxide inferred from space-based measurements. Global Biogeochemical Cycles. https://doi.org/10.1002/2014GB004805

Reddy, M. S., & Venkataraman, C. (2002). Inventory of aerosol and sulphur dioxide emissions from India. Part II - Biomass combustion. Atmospheric Environment. https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00464-2

Reders, K., & Mundt, T. (2005). Marine Fuels. In Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. https://doi.org/10.1002/14356007.j16_j03

Scherer, H. W. (2001). Sulphur in crop production - Invited paper. European Journal of Agronomy. https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00082-4

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, S. (2018). Atlas Agroalimentario 2012-2018. Sevicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). https://doi.org/10.1111/resp.12002

Skrynetska, I., Ciepał, R., Kandziora-Ciupa, M., Barczyk, G., & Nadgórska-Socha, A. (2018). Ecophysiological Responses to Environmental Pollution of Selected Plant Species in an Industrial Urban Area. *International Journal of Environmental Research*, *12*(2), 255–267.

Stockwell, W. R., Middleton, P., Chang, J. S., & Xiaoyan Tang. (1990). The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling. Journal of Geophysical Research. https://doi.org/10.1029/jd095id10p16343

Tichavska, M., Tovar, B., Gritsenko, D., Johansson, L., & Jalkanen, J. P. (2019). Air emissions from ships in port: Does regulation make a difference? Transport Policy. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.03.003

Tuccella, P., Curci, G., Visconti, G., Bessagnet, B., Menut, L., & Park, R. J. (2012). Modeling of gas and aerosol with WRF/Chem over Europe: Evaluation and sensitivity study. Journal of Geophysical Research Atmospheres. https://doi.org/10.1029/2011JD016302

Van Der Eerden L., Tonneijick, A.E.G. Crop loss due to air pollution in the Netherlands. Environmental pollution, 53: 365–376 (1988).

Vestreng, V., Myhre, G., Fagerli, H., Reis, S., & Tarrasón, L. (2007). Twenty-five years of continuous sulphur dioxide emission reduction in Europe. Atmospheric Chemistry and Physics. https://doi.org/10.5194/acp-7-3663-2007

Wang, C., Corbett, J. J., & Firestone, J. (2007). Modeling energy use and emissions from North American shipping: Application of the ship traffic, energy, and environment model. Environmental Science and Technology. https://doi.org/10.1021/es060752e

Wentzel, K.F. IUFRO studies on maximal SO2 immissions standards to protect forests. In: Ulrich, B. & Pankarth, J., ed. Effects of accumulation of air pollutants in forest ecosystems. Dordrecht, D. Reidel, 1983, pp. 295–302.

Winnes, H. (2010). Air Pollution from Ships: Emission Measurements and Impact Assessments. Department of Shipping and Marine Technology.

Zhao, F. J., Hawkesford, M. J., & McGrath, S. P. (1999). Sulphur assimilation and effects on yield and quality of wheat. Journal of Cereal Science. https://doi.org/10.1006/jcrs.1998.0241

Ziegler, I. (1972). The effect of SO3-- on the activity of ribulose-1,5-diphosphate carboxylase in isolated spinach chloroplasts. *Planta*, *103*(2), 155–163. https://doi.org/10.1007/BF00387367

ANEXO

Tabla A.1.

Planta/ Fruto	PPM/Tiempo		Referencia
Alfalfa	0.10	4 h	Tingey et al., 1973
Rábano	0.20	4 h	Tingey et al., 1973
Maíz	0.10	48 h	Laurence et al., 1979
Trigo	0.15	40 h	Laurence et al., 1979

Afectación en los cultivos

En la En la Tabla A1. Se muestran investigaciones alrededor del mundo, donde se empieza a ver las afectaciones en distintos cultivos por parte del azufre en parte por millón con respecto al tiempo en el que estuvo expuesto.

En la figura A1 tienen mapas de frecuencia de trayectoria media de 2003 a 2015 utilizando trayectorias de retroceso de masa aérea, donde (a) marzo a mayo (MAM), (b) de junio a agosto (JJA), (c) septiembre a noviembre (SON), y d) diciembre a febrero (DJF) utilizando trayectorias de retroceso de masa aérea de 4 días en un punto final de 500 m en MCMA.Para examinar los orígenes de la fuente de masa de aire que afectan a la región del estudio, utilizando el modelo HYSPLIT. se ejecutó utilizando el Centro Nacional de Investigación Atmosférica y el re análisis de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental. modelo informático que se utiliza para calcular las trayectorias de las parcelas de aire y la deposición o dispersión de contaminantes atmosféricos. Fue desarrollado por NOAA y la Oficina de Meteorología de Australia.

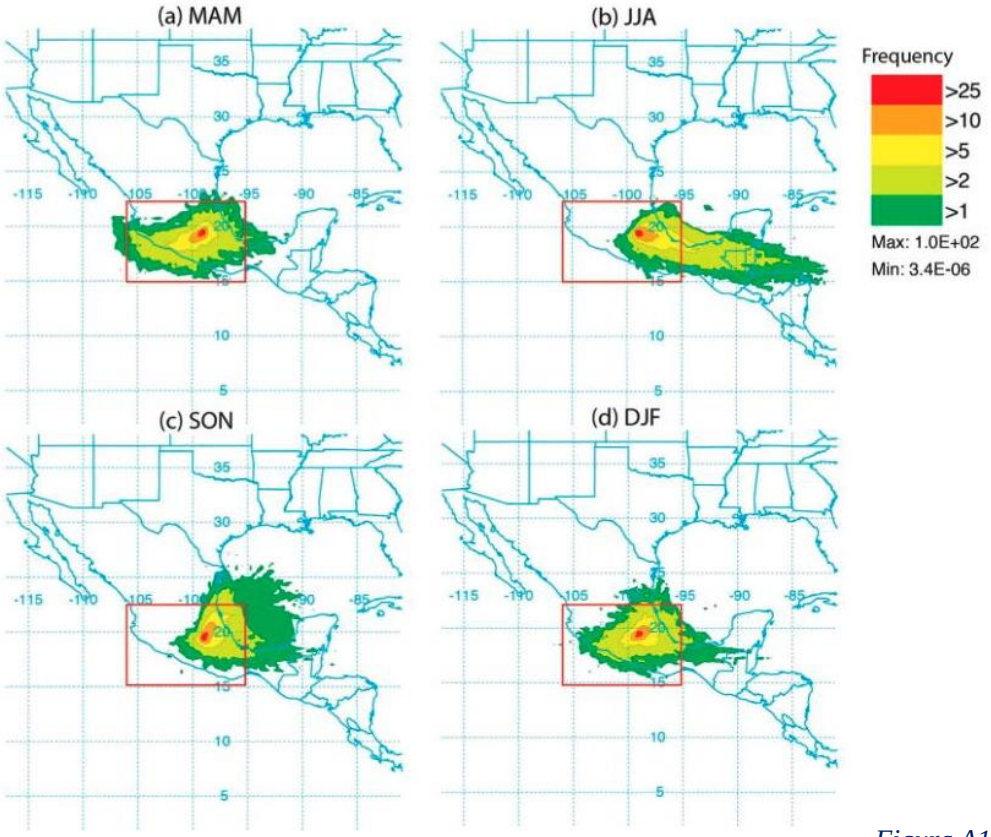

Figura A1. Dirección de los vientos

Mora, M., Braun, R. A., Shingler, T., & Sorooshian, A. (2017). Analysis of remotely sensed and surface data of aerosols and meteorology for the Mexico Megalopolis Area between 2003 and 2015. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 122(16), 8705–8723. https://doi.org/10.1002/2017JD026739

La figura A2 se muestra la Rosa de los vientos en la Ciudad de México gráfico utilizado por los meteorólogos para saber como se distribuye la dirección y velocidad del viento en una región, dividida por trimestres en el año 2019 donde; (MAM) marzo a mayo, (JJA) de junio a agosto, (SON) septiembre a noviembre y (DEF) diciembre a febrero. Se obtuvo en la página de la Secretaria de medio ambiente (SEDEMA), en la Dirección de monitoreo atmosférico de la CDMX.

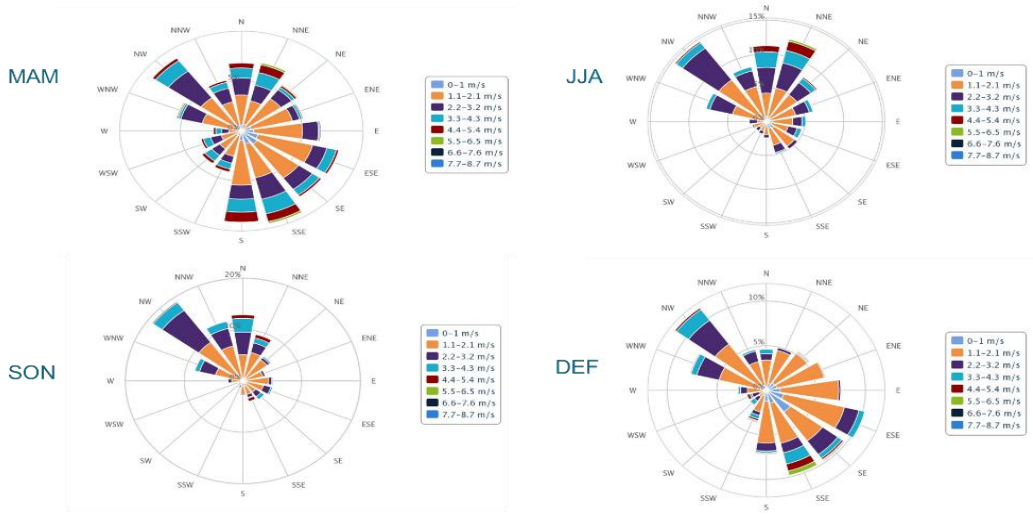

Figura A2. Rosa de los vientos CDMX (2019)