

# Potential impacts of dry SO<sub>2</sub> deposition on crop yields in Mexico; a national scale approach

## Impactos potenciales de depósitos secos de SO<sub>2</sub> en rendimientos de cultivos en México; una aproximación a escala nacional

Azuara-García, Guadalupe<sup>1</sup>; Palacios-Rosas, Efrén<sup>1</sup>; Palacios-Corte, Veranda<sup>1</sup>; Rosas-Burgess, Carlos A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, Puebla, México, C. P. 72592

\*Autor para correspondencia: guadalupe.azuara@viep.com.mx

### ABSTRACT

**Objective:** the purpose of this work is to initiate a large scale approach of potential effects of SO<sub>2</sub> on agricultural yields in Mexico as it is one of the major emitting countries of a compound with high impacts on vegetation.

**Design/methodology/approximation:** it is presented a statistical analysis of correlation (R) and linear regression (R<sup>2</sup>) between yields of 23 crops and average SO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> concentrations at municipal level by 2011. Crops were differentiated according to its access to water (irrigated and rainfed), its life cycle (annual or perennial), and its sensitivity or resistance to SO<sub>2</sub>. The P-value was applied in order to eliminate randomness in correlations. Significant correlation was observed in nine crops which accomplished simultaneously R≥20%; R<sup>2</sup>≥0.05; and P-value<0.05: plum, feed oat (green), feed oat (dried), oat (grain), feed barley (green), feed barley (dried), feed corn (green), melon and grape.

**Results:** the average yields of the correlated crops were compared in three spatial contexts: national, municipalities with SO<sub>2</sub>>0, and municipalities with the highest SO<sub>2</sub> concentrations. For the latter, the average yields of the resistant crops in the rainfed modality were 1.7 to 5.2 times greater than the national average, whereas for the sensitive crops, the yields were 12.9% to 57.8% lower. In the irrigated modality, the resistant crops obtained an increase of 59%, meanwhile sensitive crops throw yields 22% to 51.7% lower.

**Findings/conclusions:** for the analyzed crops, it is suggested a proportionally greater positive impact in yields.

**Keywords:** sulfur dioxide, contamination, potential effects.

### RESUMEN

**Objetivo:** iniciar una aproximación de gran escala de efectos potenciales del SO<sub>2</sub> en rendimientos de cultivos por el alto impacto de éste en la vegetación y por los grandes volúmenes que México emite del compuesto a nivel global.

**Diseño/metodología/aproximación:** se realizó un análisis estadístico de correlación (R y R<sup>2</sup>) entre rendimientos (23 cultivos) y concentraciones SO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> a nivel municipal para 2011. Los cultivos se diferenciaron de acuerdo a su modalidad (temporal y riego), ciclo (anual y perenne) y condición de resistencia o sensibilidad al SO<sub>2</sub>. Se aplicó la prueba P-valor para eliminar aleatoriedad.

**Resultados:** se obtuvo correlación significativa en nueve cultivos (ciruela, avena forrajera verde y seca, avena grano, cebada forrajera verde y seca, maíz forrajero verde, melón y uva) que cumplieron simultáneamente las condiciones de  $R \geq 20\%$ ;  $R^2 \geq 0.05$ ; y  $P\text{-valor} < 0.05$ . En ellos se realizó un comparativo de rendimientos promedio en tres ámbitos: nacional, municipios con  $SO_2 > 0$ , y municipios con las mayores concentraciones de  $SO_2$ . Para este último grupo, comparado con el promedio nacional, los rendimientos de los cultivos resistentes en la modalidad de temporal fueron entre 1.7 y 5.2 veces más altos, y para los sensibles se observaron promedios de 12.9% a 57.8% más bajos. En la modalidad de riego, se observaron promedios 51% más altos en los resistentes, y de un 22% a un 51.7% menores en los sensibles.

**Hallazgos/conclusiones:** se observó un efecto positivo proporcionalmente mayor que el negativo en rendimientos de cultivos resistentes y sensibles, respectivamente.

**Palabras clave:** dióxido de azufre, contaminación, efectos potenciales.

Aunque no se pueden generalizar impactos negativos o positivos de las concentraciones de  $SO_2$  depositado debido a que su proceso oxidativo-reductor depende de la especie vegetal, el contenido de azufre en el suelo, la concentración y duración de la exposición, así como de la etapa del desarrollo de la planta (Agrawal, 2003), a nivel internacional se ponderan los efectos benéficos del compuesto como aporte nutricional fundamental de la vegetación, esto, una vez metabolizado para completar la demanda de azufre como nutriente (Agrawal, 2003) en los lugares con suelos naturalmente deficitarios de S y donde las prácticas agronómicas remueven grandes cantidades de azufre a través de la exportación de biomasa (Lucheta & Lambais, 2012). De tal manera que otro efecto positivo del  $SO_2$  depositado es la recuperación de suelos sódicos o alcalinos (Corrales-Maldonado *et al.*, 2014), mientras que grandes acumulaciones provocan la acidificación de los mismos con efectos nocivos para la agricultura (Rennenberg, 1984).

La dualidad de México consiste en que además de ser un gran emisor de  $SO_2$ , también es un país con vastas extensiones de suelos deficitarios de S al norte, sur y sureste del país; en el primer caso se trata de la mayor proporción nacional de zonas áridas y semiáridas, para las cuales se han propuesto alternativas de fertilización con azufre (Corrales-Maldonado *et al.*, 2014). En términos de la medición de las emisiones, México carece de inventarios sistemáticos, periódicos y actualizados, no obstante, existe un Inventario nacional de emisiones de buques (INEB) elaborado por (Bandemehr *et al.*, 2015) y mejorado por

## INTRODUCCIÓN

La presencia del  $SO_2$  en la atmósfera, emitido por vulcanismo o por procesos antropogénicos, principalmente de combustión de fósiles sulfurados como carbón, petróleo, gas natural, etc., constituye un gas nocivo para la salud humana (OMS, 2002, 2005) El  $SO_2$ , una vez removido de la atmósfera mediante deposición húmeda y seca -después de un tiempo de vida de aproximadamente 25 horas (Seinfeld & Pandis, 2006), y sigue transformándose en suelos y vegetación. En 2018, México se ubicó como el cuarto país con más emisiones antropogénicas de dióxido de azufre (con  $1897 \text{ kt año}^{-1}$ ) a nivel internacional (Dahiya & Myllyvirta, 2019), y su contribución global ha sido alta desde 2005, de acuerdo con el Ozone Monitoring Instrument (OMI) de la NASA (Global  $SO_2$  pollution map - Google My Maps, n.d.). A esos volúmenes se deben sumar al país las emisiones de origen volcánico, que llegaron a 432 kt anuales en 2018 (18.5% del total de ese año) y constituyen casi una cuarta parte de las emisiones de México de 2005 a la fecha.

El  $SO_2$  es la principal forma de azufre atmosférico que afecta la vegetación; a bajas concentraciones presenta efectos benéficos en la productividad vegetal pero ante grandes ingestas causa efectos dañinos en el desarrollo de las plantas (Agrawal, 2003); de ahí la importancia de evaluar sus impactos en la agricultura a nivel nacional por implicaciones potenciales en la seguridad alimentaria.

Como se ha demostrado desde hace más de un siglo, el azufre (S) es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas, y aunque éste se encuentra de forma abundante en el planeta, su distribución geográfica es desigual y se expresa en suelos con deficiencia de S (Lucheta & Lambais, 2012); por tal razón, no todos los suelos satisfacen las necesidades de azufre de las plantas en la concentración y forma y apropiada, convirtiéndose el  $SO_2$  en una fuente adicional de S para la vegetación que crece en suelos deficitarios de dicho nutriente. (Rennenberg, 1984).

(Mora et al., 2018) en combinación con la modelación de la calidad del aire, cuyos resultados de concentraciones en el territorio nacional se utilizan en el presente trabajo para evaluar los impactos del dióxido de azufre en los cultivos. El objetivo de este estudio, fue identificar la correlación entre concentraciones de  $\text{SO}_2$  depositado en suelo, y los rendimientos de cultivos en México, a una desagregación espacial municipal para observar efectos potenciales benéficos o perjudiciales del  $\text{SO}_2$  en la agricultura.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Cartográficos.** Los datos de las concentraciones de  $\text{SO}_2$  se tomaron de los resultados obtenidos por (Mora et al., 2018). Los valores de rendimientos provienen del Sistema de Información Agropecuaria y Pesquera (SIAP) (Programa Gobierno en Línea, 2016) para el año correspondiente con el inventario (2011) en su desagregación municipal. El formato espacial de los resultados de la modelación de las emisiones fue en celdas de  $0.25 \times 0.25$  grados (aprox.  $27.7 \text{ km} \times 27.7 \text{ km}$ ) teniendo por unidad de medida  $\text{mol m}^{-2-1}$ , por lo que un primer paso para establecer la comparabilidad de ambos valores, consistió en transformar las concentraciones de  $\text{SO}_2$  por celda a promedios municipales de  $\text{SO}_2$  por hectárea ( $\text{gr ha}^{-1}$ ) con la ayuda de un Sistema de Información Geográfica (SIG), aplicando un *ajuste espacial* para garantizar el traslape cartográfico, ya que se encontró un desplazamiento importante del dominio modelado con la cartografía nacional (INEGI, 2018) en el mismo sistema de coordenadas geográficas (WGS, 1984). Posteriormente se realizaron *estadísticos zonales* en el SIG para obtener valores de concentración promedio de  $\text{SO}_2$  con-

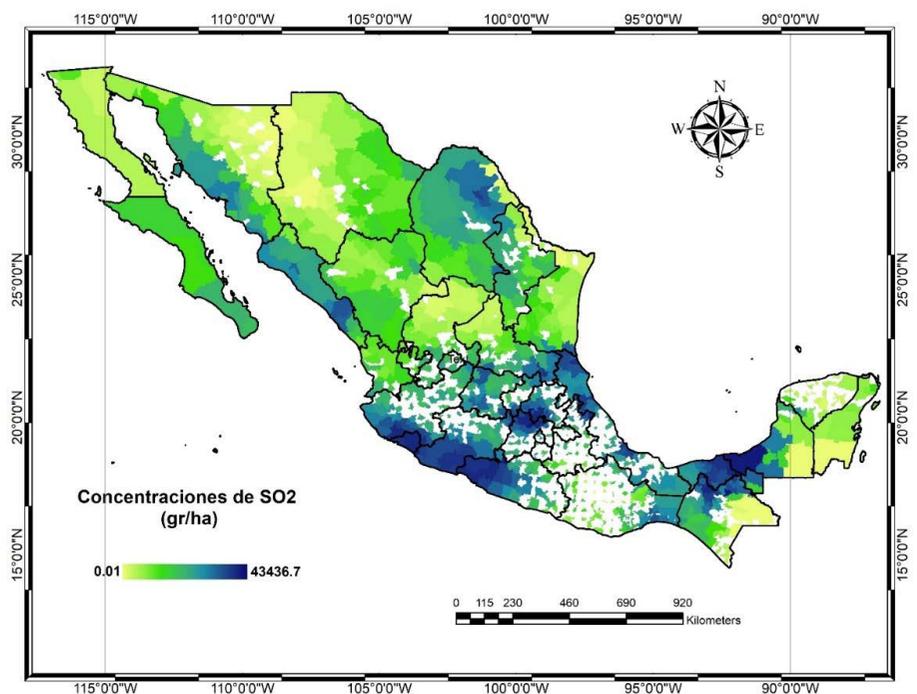
sistentes por municipio en formato vectorial. Derivado del procedimiento espacial, se identificaron 998 municipios con presencia de depósitos secos de  $\text{SO}_2$  ( $\text{SO}_2 > 0$ ) considerados como el área de estudio (AE), que ocupan una superficie de  $1,641,940.6 \text{ km}^2$  equivalente al 83.9% del territorio nacional (Figura 1).

**Estadísticos.** Se realizaron dos aproximaciones estadísticas: Un análisis bivariado entre concentraciones promedio de  $\text{SO}_2$  (en  $\text{g ha}^{-1}$ ) y rendimientos de cultivos ( $\text{t ha}^{-1}$ ) para inferir una posible vinculación entre ambas variables a través del coeficiente de correlación (R) y de la regresión lineal ( $R^2$ ). Adicionalmente, con el propósito de eliminar la aleatoriedad a los resultados de las correlaciones, se aplicó la prueba P-valor.

La segunda aproximación estadística consistió en un análisis comparativo de rendimientos por cultivo (aquellos que resultaron con correlaciones significativas y no aleatorias) para tres conjuntos espaciales: promedio nacional, promedio del AE, y promedio de los municipios con muy altas concentraciones (MMAC) de  $\text{SO}_2$  para 2011.

La selección de los cultivos de este trabajo partió de la clasificación identificada en la literatura (Callisaya, 2015; Castillo, 2010), quienes identifican cultivos sensibles (CS) y resistentes (CR) a concentraciones de  $\text{SO}_2$ . En esta aproximación de gran escala se consideraron inicialmente 23 cultivos en los que se hace la distinción entre los anuales (A) y perennes (P), conforme al Cuadro 1.

Los cultivos se diferenciaron de acuerdo a su modalidad de acceso al agua (Temporal (Te) y Riego (Ri)), de tal modo que se pudiera identificar para cada cultivo el impacto de la irrigación en la variabilidad de los rendimientos, y si éste modificaba las correlaciones.



**Figura 1.** Distribución de las concentraciones de  $\text{SO}_2$  por municipio en México en  $\text{g ha}^{-1}$ .

**Cuadro 1.** Conjunto inicial de cultivos de acuerdo y su sensibilidad a al SO<sub>2</sub> conforme a literatura y su ciclo de cultivo.

Nombre científico	Cultivo	Ciclo	Sens/	Nombre científico	Cultivo	Ciclo	Sens/
<i>Medicago sativa</i>	Alfalfa FV*	P	CS	<i>Pisum sativum</i>	Arvejón	A	CS
<i>Prunus domestica</i>	Ciruela	P	CS	<i>Avena sativa</i>	Avena FS**	A	CS
<i>Juglans regia</i>	Nuez	P	CS		Avena FV*	A	CS
<i>Musa paradisiaca</i>	Plátano	P	CS		Avena grano	A	CS
<i>Vitis</i>	Uva	P	CS	<i>Hordeum vulgare</i>	Cebada FA***	A	CS
<i>Cucurbita pepo</i>	Calabacita	A	CR		Cebada FV*	A	CS
<i>Cucurbita maxima</i>	Calabaza	A	CR		Cebada grano	A	CS
<i>Zea mays</i>	Maíz FV*	A	CR	<i>Phaseolus vulgaris</i>	Frijol	A	CS
	Maíz grano	A	CR	<i>Vicia faba</i>	Haba grano	A	CS
<i>Cucumis melo</i>	Melón	A	CR		Haba verde	A	CS
<i>Cucumis sativus</i>	Pepino	A	CR	<i>Triticum aestivum</i>	Trigo grano	A	CS
<i>Daucus carota</i>	Zanahoria	A	CR				

Sens/= Sensibilidad, \*FV = Forrajero verde, \*\*FS = Forrajero seco, \*\*\*FA = Forrajero achicalado.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Resultados del Coeficiente de correlación (R)

**Modalidad temporal:** Se obtuvieron valores muy altos de correlación (>75%) en zanahoria y cebada FS; correlación alta (50 a 75%) en alfalfa FV, avena SF y melón; correlación media (25 a 50%) en cinco cultivos, y débil correlación (de hasta 25%) en los restantes 12 cultivos, como se describe en el Cuadro 2. El cultivo de la uva no tuvo observaciones suficientes (N.D) en esta modalidad para 2011.

**Modalidad riego:** Se observó un solo cultivo con correlación muy alta (alfalfa FV); correlación alta en tres cultivos (avena grano, cebada FV, y haba grano); correlación media en tres (uva, avena FV y cebada grano); y correlación débil en 15 cultivos. El cultivo arvejón no tuvo suficientes observaciones (Cuadro 2).

### Resultados de la regresión lineal (R<sup>2</sup>)

**Modalidad Temporal:** de acuerdo con el Cuadro 2, los valores significativos (≥0.05) se presentaron en 12 cultivos: alfalfa FV, ciruela, arvejón, avena FS, calabaza, cebada grano, cebada FV, haba verde, maíz FV, melón, pepino y zanahoria. Modalidad Riego: Ocho cultivos presentaron valores significativos: va, avena FV, avena grano, calabaza, cebada FV, cebada grano, haba grano y maíz FV.

### Resultados de la prueba P-Valor

Los cultivos con valores <0.05 en P fueron: ciruela, avena FS, cebada FS y cebada FV, maíz FV y melón, todos ellos de temporal. En Riego: uva, avena FV, avena grano, calabacita, cebada FV y maíz FV. Con los resultados obtenidos, los cultivos que tanto en riego como en tem-

poral cumplieron simultáneamente las siguientes condiciones estadísticas: 1) P-valor<0.05; 2) R<sup>2</sup>≥0.05; y 3) R≥20%, fueron considerados como correlacionados en este estudio.

En la modalidad de temporal se trató de ciruela, avena FS, cebada FA, cebada FV, maíz FV y melón. En la modalidad de riego se registraron uva, avena FV, avena grano, cebada FV y maíz FV conforme al Cuadro 2. La cebada FV y el maíz FV fueron cultivos consistentes en las correlaciones de ambas modalidades de acceso al agua.

**Resultados del comparativo de rendimientos.** Se implementó para los cultivos de acuerdo a su modalidad y a su sensibilidad o resistencia al SO<sub>2</sub>. El grupo MMAC mostró con mayor claridad la tendencia negativa o positiva de los rendimientos de los cultivos sensibles y resistentes, respectivamente, respecto del promedio nacional. El número de los municipios con muy altas concentraciones de SO<sub>2</sub> varía de acuerdo al cultivo; para definir las clases de dicho grupo por cultivo se utilizó el método *natural breaks* (que las estableció a partir de las diferencias relativamente grandes entre los valores de concentración de dióxido de azufre); considerando la primera, o la primera y segunda clases delimitadas, con el objetivo de contar con suficientes municipios en la comparación, obteniendo los siguientes valores: en Temporal los CS de los MMAC tuvieron en melón y ciruela rendimientos 12.9% y 57.8% menores que su media nacional respectivamente; mientras que los CR fueron mayores en 2.6, 5.2, 1.7 y 2.2 veces el promedio nacional para avena FS, cebada FA, cebada FV y maíz FV respectivamente, (Figura 2a, b). En Riego: el CS avena grano registró rendimientos pro-

**Cuadro 2.** Valores de Coeficiente de correlación (R), Regresión lineal (R<sup>2</sup>) y prueba P-valor entre concentraciones de SO<sub>2</sub> y rendimientos por cultivo y modalidad para 2011.

Ciclo	Cultivo	Nombre científico	Temporal			Riego		
			R	R <sup>2</sup>	P-valor	R	R <sup>2</sup>	P-valor
P	Alfalfa FV*	<i>Medicago sativa</i>	-65.5	0.429	0.16	-0.85	0	0.9
P	Ciruela	<i>Prunus domestica</i>	-22.4	0.05	0.03	-6.7	0.005	0.8
P	Nuez	<i>Juglans regia</i>	-9.7	0.009	0.7	4.3	0.0018	0.6
P	Plátano	<i>Musa paradisiaca</i>	-0.1	0	0.9	16.6	0.028	0.2
P	Uva	<i>Vitis</i>	N.D	N.D	N.D	36.6	0.134	0.04
A	Arvejón	<i>Pisum sativum</i>	-36	0.13	0.28	N.D	N.D	N.D
A	Avena FS**	<i>Avena sativa</i>	53.4	0.286	0.07	-19.2	0.037	0.57
A	Avena FV*		13.9	0.019	0.07	32.8	0.108	0.0000001
A	Avena grano		3	0.009	0.9	-50.2	0.252	0.017
A	Calabacita	<i>Cucurbita pepo</i>	-21.7	0.047	0.2	-19.5	0.038	0.004
A	Calabaza	<i>Cucurbita maxima</i>	-25.3	0.064	0.2	-23.2	0.054	0.3
A	Cebada FA***	<i>Hordeum vulgare</i>	93.8	0.88	0.02	8.8	0.007	0.9
A	Cebada FV*		36.6	0.134	0.026	67.9	0.461	2.00E-10
A	Cebada grano		-6.7	0.005	0.6	-26.4	0.07	0.1
A	Frijol	<i>Phaseolos vulgaris</i>	2.5	0	0.56	7.8	0.006	0.1
A	Haba grano	<i>Vicia faba</i>	-11.6	0.014	0.59	-59.3	0.352	0.07
A	Haba verde		23.3	0.054	0.3	5.7	0.0033	0.7
A	Maíz FV*	<i>Zea mays</i>	28.7	0.082	0.003	22.4	0.05	0.01
A	Maíz grano		-1.8	0.0003	0.6	2.1	0.00005	0.6
A	Melón	<i>Cucumis melo</i>	-69.7	0.486	0.00008	4.2	0.0018	0.66
A	Pepino	<i>Cucumis sativus</i>	28.8	0.083	0.14	-5.6	0.0032	0.5
A	Trigo grano	<i>Triticum aestivum</i>	4.4	0.0019	0.7	4.9	0.0024	0.54
A	Zanahoria	<i>Daucus carota</i>	81.7	0.667	0.09	-15.2	0.023	0.29

medio 51% más bajos en los MMAC que el promedio del país. Los CR también mostraron rendimientos promedio mayores en 22%, 51.7%, 43% y 27% en uva, avena FV, cebada FV, y maíz FV respectivamente, que la media nacional (Figura 2c, d).

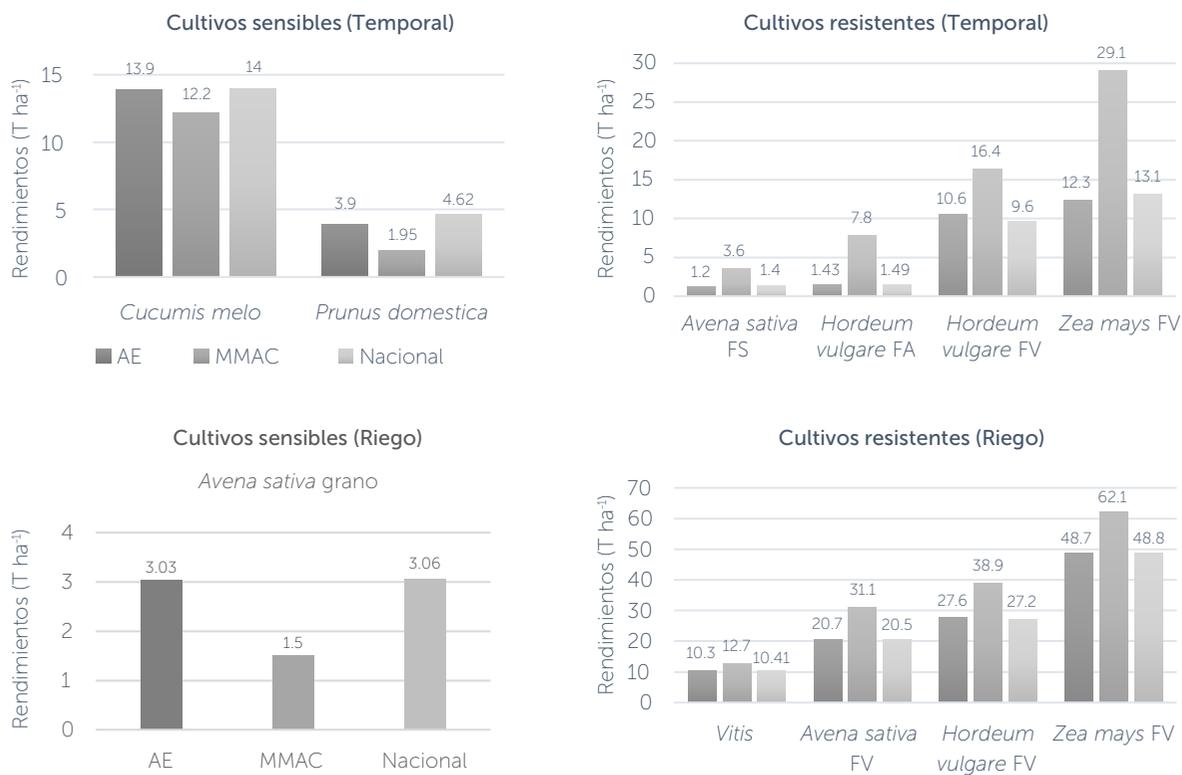
La cebada en sus tres cultivos (grano, FV y FS) resultó ser CR en este estudio, en contraste con las clasificaciones previas; en sentido inverso, el cultivo melón en ambas modalidades (Te y Ri), considerado previamente como resistente, resultó CS.

En nueve de los 23 cultivos analizados se verificó correlación para el año 2011, lo que sugiere que aún

con diferencias de suelos y concentraciones de SO<sub>2</sub> en el territorio nacional, existe un impacto en ambos sentidos (positivo y negativo) en los cultivos. El conjunto de los MMAC permite corroborar dichos impactos; se observa que el efecto positivo en los CR es proporcionalmente mayor, en términos de incremento de los rendimientos, que el efecto negativo que sufrieron los CS respecto de la media nacional. La modalidad de acceso al agua indicó que el efecto positivo del SO<sub>2</sub> es mayor para los CR de temporal que para los CR irrigados como lo mostraron la cebada FV y el maíz FV al estar presentes en las dos modalidades. Mientras el incremento del rendimiento de la cebada FV res-

pecto de la media nacional fue del 43% en riego, el aumento fue de 71% en temporal, es decir de casi el doble que el registrado por la cebada irrigada; por su parte, el maíz FV obtuvo un aumento de 27% en sus rendimientos en riego, en tanto que el incremento en temporal fue de 222%, al menos ocho veces mayor que el primero comparado con el promedio nacional.

En lo que correspondió a los rendimientos promedio de cultivos correlacionados del AE, no se evidenciaron grandes diferencias respecto de los rendimientos promedio nacionales; sin embargo, los CS mostraron más consistencia en cuanto al impacto negativo del SO<sub>2</sub>



**Figura 2.** Rendimientos promedio de cultivos por modalidad: a) CS y b) CR de temporal; y c) CS y d) CR de riego, por ámbitos de comparación (Nacional, AE y MMAC).

al obtener, en todos los casos, rendimientos ligeramente inferiores, destacando la ciruela con 16% menor rendimiento.

En contraparte, sólo el 38% de los CR correlacionados (cebada FV de temporal y de riego, y la avena FV de riego) obtuvieron rendimientos mayores en el AE respecto del promedio nacional posiblemente debido a las diferencias de azufre en los suelos, concentraciones de SO<sub>2</sub> depositado o incluso condiciones de acidificación de suelos, que aún deficitarios del nutriente, no pueden absorber el aporte del SO<sub>2</sub>. Lo que requiere un análisis detallado en sus distribuciones geográficas específicas.

Los cultivos perennes resultaron más afectados a muy altas concentraciones de SO<sub>2</sub>, probablemente por un efecto acumulativo en suelo, o por mayor exposición de SO<sub>2</sub> en las partes aéreas de la planta que resultaría significativo complementar a partir su mapeo. Así mismo, es necesario ampliar la ventana temporal de análisis estadístico para confirmar o descartar correlación en aquellos cultivos con valores significativos en R y R<sup>2</sup>, pero con altos valores de aleatoriedad. De igual manera, es necesario profundizar el estudio en las zonas de concentraciones medias y bajas de SO<sub>2</sub> a nivel cartográfico y estadístico con el propósito de identificar zonas con

suelos deficitarios de azufre y en las que pudiera resultar fundamental la presencia de SO<sub>2</sub> depositado.

El signo de los valores de las correlaciones obtenido respecto de su previa clasificación sólo se pudo verificar plenamente (Ri y Te) en seis cultivos: alfalfa FV, ciruela, maíz FV, arvejón, cebada grano y haba grano; en ocho hubo correspondencia al menos en una modalidad, mientras que, en nueve, el sentido de la correlación fue contrario. Se sugiere que esta divergencia también se explica por la diferenciación de concentraciones de SO<sub>2</sub> y contenidos de S en los suelos del país. El cultivo maíz para grano no presentó impactos negativos o positivos significativos, pero dada la amplia distribución del cultivo en el territorio nacional, es probable que existan zonas en las que sea importante la presencia del SO<sub>2</sub>. Los cultivos forrajeros, fundamentalmente cíclicos, resultaron ser los más beneficiados de altas concentraciones de dióxido de azufre.

Las futuras concentraciones de SO<sub>2</sub> atmosférico antropogénico tienen una tendencia decreciente, fundamentalmente a causa del previsible agotamiento de los combustibles fósiles más que por la aplicación de normatividad (que sí generó disminuciones de SO<sub>2</sub> en Europa y Estados Unidos (Bauters & Bauters, 2016), de tal modo,

que las formas de compensación de S como nutriente de cultivos serán un tema de discusión en la producción agrícola. Para poder hacer esas comparaciones, hacen falta datos actuales y permanentes de emisiones, los cuales pueden ahora ser evaluados a partir de la modelación con información remota disponible.

## CONCLUSIONES

Por primera vez se realiza una aproximación de escala nacional de impactos potenciales del  $\text{SO}_2$  en rendimientos de cultivos en México, aplicando un análisis estadístico de correlación ( $R$  y  $R^2$ ) entre rendimientos (de 23 cultivos) y concentraciones de  $\text{SO}_2$  en depósitos secos por hectárea a nivel municipal. El efecto benéfico de altas concentraciones de  $\text{SO}_2$  en los cultivos resistentes es proporcionalmente más grande en temporal que en riego; en el caso de la cebada FV y maíz FV dichos incrementos son de 1.7 y 8 veces mayores respectivamente, que los obtenidos en riego. En ambas modalidades, los cultivos forrajeros resultaron más beneficiados de altas concentraciones de  $\text{SO}_2$ . Los cultivos sensibles están asociados principalmente al ciclo perenne. La importancia del  $\text{SO}_2$  como fuente adicional de azufre en los cultivos debe ser evaluada a mayor profundidad en México ante posibles escenarios de reducción de las emisiones antropogénicas del compuesto y a la presencia extendida en el país de suelos deficitarios del azufre como macronutriente.

## AGRADECIMIENTOS

Al Programa para el Desarrollo Profesional Docente (PRODEP) por el financiamiento de estancia posdoctoral 2019-2020 al CA- 321 del Instituto de Ciencias de la BUAP.

## LITERATURA CITADA

- Agrawal, M. (2003). Plant Responses to Atmospheric Sulphur. *Sulphur in Plants*, 279–293. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-0289-8\\_15](https://doi.org/10.1007/978-94-017-0289-8_15)
- Bandemehr, A., Muehling, B., Corbett, J., & Comer, B. (2015). U.S.-Mexico Cooperation on Reducing Emissions from Ships through a Mexican Emission Control Area: Development of the First National Mexican Emission Inventories for Ships Using the Waterway Network Ship Traffic, Energy, and Environmental Model (ST Issue May). <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P100MPDM.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2011+Thru+2015&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=>
- Bauters, C., & Bauters, G. (2016). Air pollution. *Presse Medicale*, 45(1), 73–77. <https://doi.org/10.1016/j.lpm.2015.03.029>

- Callisaya, I. (2015). Sensibilidad de las especies vegetales a los principales contaminantes atmosféricos. *Apthapi*, 1(1), 94–104. <http://ojs.agro.umsa.bo/index.php/ATP/article/view/136/136>
- Castillo, C. (2010). El Dióxido de Azufre y sus Efectos sobre las Plantas. *La Estafa de La Certificación Ecológica*. <https://estafaecologica.wordpress.com/2010/09/22/el-dioxido-de-azufre-y-sus-efectos-sobre-las-plantas/>
- Corrales-Maldonado, C. G., Vargas-Arispuro, I., Vallejo-Cohén, S., & Martínez-Téllez, M. A. (2014). Deficiencia De Azufre En Suelos Cultivables Y Su Efecto En La Productividad. *BIOTecnia*, 16(1), 38. <https://doi.org/10.18633/bt.v16i1.32>
- Dahiya, S., & Myllyvirta, L. (2019). emisiones globales de  $\text{SO}_2$  (K. Ford, N. Sivalingam, S. Ayech, & A. Jacobsen (Eds.)). Greenpeace. <https://www.greenpeace.org/mexico/publicacion/3080/base-de-datos-de-puntos-criticos-de-emisiones-globales-de-so2/>
- Global  $\text{SO}_2$  pollution map - Google My Maps. (n.d.). Retrieved April 11, 2020, from [https://www.google.com/maps/d/u/1/viewer?mid=1qkTf-y6jxARFtkU5MHaJv\\_ZA7T\\_pJDmv&ll=28.77966570156898%2C7.156781313121996&z=2](https://www.google.com/maps/d/u/1/viewer?mid=1qkTf-y6jxARFtkU5MHaJv_ZA7T_pJDmv&ll=28.77966570156898%2C7.156781313121996&z=2)
- INEGI. (2018). Marco Geoestadístico. <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/>
- Lucheta, A. R., & Lambais, M. R. (2012). Sulfur in agriculture. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 36(5), 1369–1379. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832012000500001>
- Mora, M., Alcántara, J., Azuara, G., Pérez-Avilés, R., Ramírez-Bravo, E., Barreiro, S., & Ortiz, B. (2018). Implicaciones del aumento de emisiones de bióxido de azufre provenientes de barcos sobre algunos elementos de la biodiversidad del territorio nacional.
- OMS. (2002). Informe sobre la salud en el mundo 2002: Reducir los riesgos y promover una vida sana. Organización Mundial de La Salud OPS, 175.
- OMS. (2005). Actualización mundial 2005. 1–21.
- Programa Gobierno en Línea. (2016). Datos Abiertos. In 2016 (p. 35). <https://www.datos.gov.co/Salud-y-Proteccion-Social/SIVICAP-2016/rj6b-fmu2>
- Rennenberg, H. (1984). The Fate of Excess Sulfur in Higher Plants. *Annual Review of Plant Physiology*, 35(1), 121–153. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.35.060184.001005>
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2006). *ATMOSPHERIC From Air Pollution to Climate Change SECOND EDITION*. John Wiley & Sons, Inc. [https://www.academia.edu/35730031/ATMOSPHERIC\\_CHEMISTRY\\_AND\\_PHYSICS\\_From\\_Air\\_Pollution\\_to\\_Climate\\_Change\\_SECOND\\_EDITION](https://www.academia.edu/35730031/ATMOSPHERIC_CHEMISTRY_AND_PHYSICS_From_Air_Pollution_to_Climate_Change_SECOND_EDITION)

