Received: 15 Dec. 2023, Accepted: 16 May 2023

Published online: 30 June 2023



## Mapa de quema de caña de azúcar durante la zafra 2021-2022 en San Luis Potosí, México<sup>☆</sup>

### Map of the sugarcane burning during the 2021-2022 harvest in San Luis Potosí, México

Pedro Pérez-Medina<sup>a</sup>, María Guadalupe Galindo Mendoza<sup>b</sup>, María Teresa Sánchez Salazar<sup>c</sup>, Angel de Jesús Quiroz Gaspar<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Av. Manuel Nava 201, 20. piso, Zona Universitaria, CP 78397, San Luis Potosí, San Luis Potosí, México

#### Resumen

Algunas prácticas realizadas en los agroecosistemas de México resultan de alto impacto para el ambiente y la salud humana; una de ellas es la quema de caña de azúcar. Con el mapa elaborado, utilizando el índice de severidad de quema dNBR, se constató que de las 103 mil hectáreas de caña que se cosecharon durante la zafra 2021-2022, en las áreas que abastecen los cuatro ingenios de San Luis Potosí, 72.5 % fueron quemadas con diferentes grados de severidad. Las características del sistema productivo, tales como la superficie cosechada, la productividad y el método de cosecha, determinan su impacto en los servicios ecosistémicos tales como la calidad del aire. Bajo estos criterios, la zona de abasto del ingenio San Miguel del Naranjo, que tiene la mayor superficie cañera del estado, es la de menor impacto. No obstante, es recomendable apoyar los resultados obtenidos con la verificación en campo y/o el uso de técnicas complementarias.

Palabras clave: actividad cañero azucarera, cosecha, método de doble quema, afectaciones, sistemas de vigilancia.

#### **Abstract**

Some practices used in the agroecosystems of México have high impact on the environment and human health; one of these is the burning of sugarcane. Using the map created with the burnt severity index dNBR index, it was found that of the 103 thousand hectares of sugarcane harvested during the 2021-2022 harvest, 72.5% was burned with varying degrees of severity in the areas that supply the four mills of San Luis Potosí. The characteristics of the production system, such as harvested area, productivity, and harvesting method, determine the impact on ecosystem services such as air quality. According to these criteria, although the San Miguel del Naranjo sugar mill supply surface is the largest sugarcane area in the state, it has the least impact. However, it is recommended that the results obtained be supported by field verification and/or the use of complementary techniques.

Keywords: sugarcane activity, harvesting, double burning method, damages, monitoring systems.

#### 1. Introducción

La contaminación del aire consiste en partículas gaseosas, sólidas o líquidas, con sustancias que pueden dañar la salud de seres humanos, animales y plantas, así como el medio físico del planeta. La mayor parte de la contaminación del aire se genera por actividades humanas, como los procesos de las fábricas y el uso de automóviles, aviones y aerosoles, entre otros, que se denominan fuentes antropogénicas (National Geographic, 2022).

Según Deb (2019), las diez principales causas de la contaminación del aire son: la quema de combustibles fósiles, las emisiones industriales, la contaminación del aire interior, los incendios forestales, el proceso de descomposición microbiana, el transporte, la quema a cielo abierto de desechos de basura, la

<sup>&</sup>lt;sup>b</sup>Laboratorio Nacional de Geoprocesamiento de Información Fitosanitaria, Coordinación para la Innovación y Aplicación de la Ciencia y la Tecnología, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Av. Sierra Leona 550-2a, Primer Piso, Lomas de San Luis, CP 78210, San Luis Potosí, San Luis Potosí, México. <sup>c</sup>Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito de la Investigación Científica, CP 04510, Ciudad de México, CDMX, México.

<sup>†©</sup> P. Pérez-Medina, M. G. Galindo Mendoza, M. T. Sánchez Salazar, A. J. Quiroz Gaspar. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/), which permits noncommencial sharing of the work and adaptions, provided the original work is properly cited and the new creations are licensed under identical terms.

<sup>\*</sup>E-mail address: A35047@alumnos.uaslp.mx

construcción y demolición, las actividades agrícolas y el uso de productos químicos y sintéticos.

Las actividades agrícolas han provocado en gran medida la disminución de la calidad del aire. Los pesticidas y fertilizantes constituyen la principal fuente de contaminación el aire circundante. Estos químicos permanecen en el aire, se mezclan con el agua y se filtran en el suelo, destruyendo cultivos y causando numerosos problemas relacionados con la salud.

De las emisiones provenientes del sector agropecuario, 40 % proviene de la ganadería, 16 % de los fertilizantes minerales, 17 % de la quema de biomasa y 8 % de los desechos agrícolas (FAO, 2020).

La quema de desechos agrícolas es una práctica común en varios países del mundo. Los residuos de cereales como el arroz, el trigo y el maíz; oleaginosas como el cacahuate y la mostaza; fibras como el yute y el algodón; así como la caña de azúcar, son quemados año con año, produciendo una importante cantidad de contaminantes.

En México, la quema de residuos agrícolas se continúa utilizando para facilitar el desmonte de tierras, la absorción más rápida de los nutrientes, el control de pastos y malezas y la reducción de la proliferación de plagas (Santiago-de la Rosa et al., 2017).

La caña de azúcar es el único cultivo en el cual, tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo, se realiza una doble quema al momento de la cosecha. En la primera quema, se eliminan las hojas de la caña para que los tallos queden expuestos, con lo cual se ahuyenta a los insectos, serpientes y demás fauna peligrosa; aunado a ello, se facilita la cosecha manual y la mecánica. Posterior a la cosecha, se realiza la segunda quema para conseguir los fines perseguidos en los otros cultivos donde se realiza esta práctica (Mugica-Álvarez et al., 2018).

La quema de sólidos y desechos agrícolas contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero CO2, N2O, CH4, contaminantes atmosféricos CO, NH3, NOx, SO2, NMHC, compuestos orgánicos volátiles, partículas PM y carbono negro (BC), lo que supone una amenaza para la salud humana y el ambiente (Jain et al., 2014).

Además del calentamiento global, la lluvia ácida, la reducción de la productividad en los cultivos agrícolas y la pérdida de biodiversidad, la exposición directa de los humanos y otros seres vivos a la contaminación generada se asocia a enfermedades debilitantes y mortales como el cáncer de pulmón, los accidentes cerebrovasculares, las cardiopatías y la bronquitis crónica, por lo que es el cuarto riesgo mortal para la salud humana en el mundo, causando una de cada diez muertes.

Alrededor del 87 % de la población mundial vive en países en los que los niveles de contaminación ambiental superan las directrices de calidad del aire establecidas por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Las muertes prematuras debidas a la contaminación atmosférica le cuestan a la economía mundial 225 mil millones de dólares en pérdidas por ingresos laborales; o bien, 5.11 billones de dólares por pérdidas en bienestar (WB y IHME, 2016).

Según cifras del Sistema de Información Agroalimentaria y

Pesquera (SIAP, 2022), de las 15 entidades productoras de caña de azúcar de México, San Luis Potosí es la segunda con mayor superficie, y la tercera con más producción. En ella se producen 5.7 millones de toneladas de caña de azúcar con fines industriales. La producción estatal de caña de azúcar genera ingresos aproximados a los 4.5 billones de pesos y genera empleo directo para 15 mil productores, 7 mil cortadores y mil quinientos trabajadores en los ingenios, además de una importante cantidad de empleos indirectos.

A pesar de su importancia económica y social, de las 103 mil 179 hectáreas que se cosecharon durante la zafra 2021-2022, en 72.5 % se realizaron quemas, según cifras del Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA, 2022), con las consecuentes afectaciones para el ambiente y para la salud de los pobladores que viven y trabajan en la zona cañera del estado.

Sin embargo, hasta el momento no se ha conferido la importancia debida a este tipo de prácticas. Esto queda demostrado con la ausencia de sistemas de monitoreo ambiental asociados a los diferentes agroecosistemas que se desarrollan en el medio rural. Los primeros intentos que existen por realizar este tipo de monitoreo se han realizado en países más desarrollados en este tema, que cuentan con redes de monitoreo directo en zonas rurales, sin identificar las fuentes de emisión y más enfocados a la remediación que a la prevención (Hidayat et al., 2019; Chen et al., 2020; Andreadis et al., 2022).

En México, a partir del año 2012, se hizo obligatorio el monitoreo de la calidad del aire en ciudades con más de 500 mil habitantes o con alguna actividad identificada como altamente contaminante (SEMARNAT, 2016). En la realidad, el monitoreo no se realiza en todos los lugares que cumplen con estas características, contando sólo con redes nacionales y estatales de calidad del aire, de funcionamiento variado y enfocadas sólo en la salud humana (INECC, 2022; SEMADET, 2022; Secretaría de Medio Ambiente, 2022). Por ejemplo, el estado de San Luis Potosí cuenta con cuatro estaciones de monitoreo, todas instaladas en la zona metropolitana del estado (SEGAM, 2023).

Además, se han realizado investigaciones proponiendo el monitoreo ambiental, de diferentes recursos naturales, con alcances espaciales limitados (Burgos et al., 2013), sin que hasta el momento se tenga información de la realización de monitoreos continuos, realizados en superficies rurales extensas, como los que se requieren para actividades como la agricultura.

En este sentido, surge el presente mapa que evalúa la severidad de las quemas realizadas durante la zafra 2021-2022 de la caña de azúcar, en las zonas que abastecen a los ingenios ubicados en el estado de San Luis Potosí y que, contribuyen a la emisión de gases y compuestos de efecto invernadero (GY-CEI). Todo ello, en el marco de los compromisos de reducción de emisiones de GEI contraídos por México, durante la COP21 y, en aras de la búsqueda de una industria cañera sostenible.

#### 2. Descripción del área de estudio

El área de estudio es la zona cañera que abastece los cuatro ingenios azucareros que operan en San Luis Potosí, en la región conocida como Huasteca Potosina. Además, por su ubicación geográfica, el ingenio San Miguel del Naranjo, recibe y procesa la producción de los municipios de Ocampo, Antiguo Morelos y Nuevo Morelos, del estado de Tamaulipas.

La principal vía de acceso terrestre de la zona es la Carretera Federal número 70, que atraviesa el estado de forma horizontal conectando a la capital con el Puerto de Tampico. La región también es cruzada de forma vertical por la Carretera número 85 (México-Nuevo Laredo).

Su fisiografía es variada y está compuesta por mesetas, valles, llanuras, sierras y lomeríos en las tres subprovincias que la integran: Llanuras y Lomeríos, Carso Huasteco y Gran Sierra Plegada (Figura 1). Prevalecen los climas cálidos, aunque también se pueden encontrar semicálidos e incluso templados con precipitaciones que van de los 1,200 mm a los 3,500 mm anuales. Esta zona que se integra por cuatro cuencas, se encuentra en la región hidrológica del Bajo Pánuco, con significativas corrientes debido a la amplia red fluvial que confluye hacia ella (Reyes-Pérez, et al., 2012).

El presente mapa forma parte de una investigación que aborda la situación e impactos de la industria de la caña de azúcar en México y, particularmente de San Luis Potosí, donde este cultivo es uno de los principales productos agrícolas. La industria cañera nacional enfrenta serios problemas, mismos que se acentúan en el panorama estatal; de esta investigación han surgido ponencias en congresos (Pérez-Medina, et al., 2021; Quiroz et al., 2021), un artículo publicado (Pérez-Medina, 2022) y otros, que actualmente se encuentran en revisión, así como un capítulo de libro (Quiroz-Gaspar et al., 2022).

#### 3. Métodos

Para la elaboración del padrón de la superficie de abasto de los ingenios que operan en el estado de San Luis Potosí se tomó como base la información cartográfica del 8° Informe Estadístico del Sector Agroindustrial de la Caña de Azúcar en México (SADER y CONADESUCA, 2021). Para la obtención de un padrón georreferenciado, con imágenes Sentinel-2, actualizado al año 2022, se realizó la interpretación visual y digital de la información base.

Para el cálculo de la superficie en donde se realizó la cosecha por el método de quema, se utilizó el Índice Normalizado de Área Quemada (NBR, por sus siglas en inglés). Estudios previos han encontrado que los datos obtenidos con el NBR muestran una correlación fuerte con los obtenidos en campo (r =0.84), en donde la mayor fuente de error se ha presentado entre las áreas no quemadas y las de severidad baja (Cocke et al., 2005); por lo que, aunque la confiabilidad del índice resulta adecuada, podría mejorar con una mayor cantidad de datos de campo.

Los cambios espectrales en las regiones del infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR) son la base de la mayoría de los algoritmos de mapeo de áreas quemadas, como el NBR. Los cambios en la cobertura del dosel y el brillo (debido al quemado de las hojas) se observan principalmente en la región espectral NIR, mientras que los cambios en la sequedad del paisaje se observan principalmente en la región espectral SWIR (Giglio et al., 2018).

El NBR se ha sido utilizado comúnmente para estimar la severidad de las quemas en incendios forestales en ecosistemas templados y tropicales. Sin embargo, recientemente también se ha aplicado en la evaluación de agroecosistemas, en donde se práctica la quema de residuos agrícolas (Van Dijk et al., 2021), particularmente en caña de azúcar.

Lo anterior, entendiendo como agroecosistemas a sistemas funcionales de relaciones complementarias entre los organismos vivos y su medio ambiente, delimitados arbitrariamente por el ser humano, que mantienen un equilibrio dinámico en el espacio y el tiempo, y se crean con el fin de establecer la producción agrícola (Rickler y Charles, 2004).

Por ejemplo, Baloloy et al. (2016) utilizaron el NBR para evaluar la severidad de la quema en el cultivo de caña de azúcar en Filipinas, y utilizaron la clasificación del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), modificando la paleta de colores para su representación.

En este caso se calculó el NBR (Fórmula 1), sobre la superficie resultante del padrón actualizado de la superficie de abasto de los ingenios que operan en San Luis Potosí.

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \tag{1}$$

De igual forma, el Diferencial de NBR (dNBR) se obtuvo con la Fórmula 2, para evaluar la diferencia de NBR entre la etapa prefuego y la postfuego. El cálculo se realizó de forma mensual entre noviembre de 2021 y junio de 2022, que fue el tiempo que se prolongó la zafra 2021-2022, en el estado de San Luis Potosí.

$$dNBR \circ \Delta NBR = NBRPrefuego - NBRPostfuego$$
 (2)

El área de estudio se encuentra en la zona UTM 14 Norte y el Datum es WGS 1984. La escala del mapa es 1:100,000, con esferoide WGS 84 1984, en proyección Universal Transversal de Mercator y la cuadrícula muestra intervalos de 20,000 metros en coordenadas UTM. El área mínima cartografiable que corresponde a esta escala es de 160,000 m² de acuerdo con Arteaga (2016).

El preprocesamiento de la información satelital se realizó a través de Google Earth Engine (GEE), una plataforma gratuita en la nube diseñada para procesar grandes volúmenes de datos de imágenes de satélite (petabytes) y bases de datos geoespaciales en gran diversidad de aplicaciones a escala global. GEE permite al usuario ejecutar diversos procesos y análisis utilizando la infraestructura de Google y de distintas maneras, una de

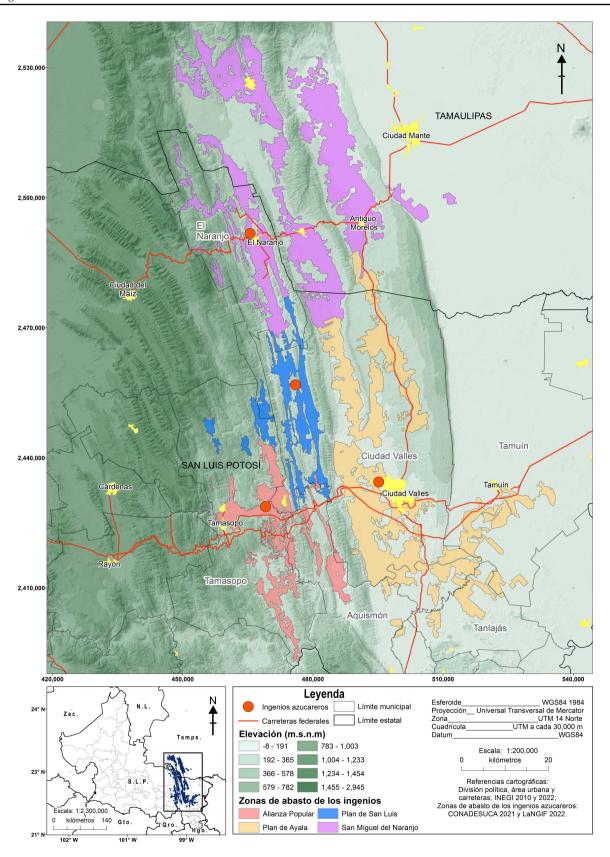


Figura 1: Ingenios azucareros de San Luis Potosí y sus zonas de abasto / Figure 1: Sugar mills of San Luis Potosí and their supply areas

ellas es a través del IDE basado en el web denominado Code Editor (UN, 2020).

Code Editor permite el acceso a las colecciones de conjuntos de datos satelitales y geoespaciales a través del desarrollo de algoritmos complejos, para el mapeo de la severidad de la quema propuesto por Keeley (2009). Los algoritmos se desarrollaron sobre la API de JavaScript para realizar el flujo de trabajo de preprocesamiento, procesamiento, generación y exportación de información de manera automatizada, para la generación del mapeo de áreas quemadas de caña de azúcar.

El algoritmo (script) en GEE permitió definir una zona de estudio (extensión del procesamiento geoespacial), a través de un archivo Shapefile (.shp) de ESRI de la zona de estudio, con lo que se evitó el procesamiento y cálculos fuera de esta área. Posteriormente, se definió el periodo de tiempo (previo y posterior) de la quema de caña de azúcar.

Se utilizaron 40 imágenes de cuatro tiles (10 por tile) de imágenes Sentinel-2, con claves: 14QML, 14QNL, 14QMK y 14QNK. Las fechas seleccionadas fueron: 2021-10-18, 2021-12-02, 2022-01-01, 2022-01-31, 2022-02-15, 2022-03-17, 2022-03-27, 2022-04-16, 2022-05-21 y 2022-06-05.

Las imágenes del periodo de tiempo para el mapeo de la quema se obtuvieron de las colecciones disponibles en los servidores de GEE, específicamente de 'COPERNICUS/S2', las cuales se filtraron por fecha y se verificó la cobertura de nubes  $(<30\,\%)$ .

Después, se realizó el enmascaramiento de nubes, nieve y sombras, para eliminarlos de las imágenes, obteniendo con ello imágenes más limpias y confiables, y con GEE se realizó un mosaico de imágenes recortadas a la zona.

Finalmente, el algoritmo realizó el cálculo del NBR para las imágenes del periodo de tiempo previas y posteriores a la quema de caña de azúcar. Cada NBR previo a la quema se restó al NBR posterior, para obtener el dNBR y aplicar el factor de escala (dNBR x 103), con lo cual se obtuvo el mapeo de severidad de la quema. Los dNBR se descargaron en formato TIF para su visualización y análisis en ArcMap 10.5.

Para la representación se utilizó la clasificación USGS (Tabla 1), y se discriminaron los rangos inferiores a 0.100 (100 en rango escalado) para facilitar la visualización, ya que estas escalas obedecen a áreas no quemadas o con rebrotes. Un mayor valor de dNBR indica un daño más severo, mientras que los valores negativos de dNBR pueden indicar el rebrote de la vegetación después del incendio (Baloloy et al., 2016).

El Chami et al. (2020), realizaron una extensa revisión de trabajos en donde se ha analizado el impacto de los servicios ecosistémicos afectados por la industria de la caña de azúcar, relacionado en varias ocasiones por las quemas realizadas durante la zafra. Por ejemplo, el cambio de contenido de carbono en el suelo; la contaminación con metales pesados; la erosión hídrica propiciada por la reducción de la conductividad hidráulica del suelo y la reducción de la calidad del aire, entre otros.

Rachid et al. (2013), estudiaron los cambios en las propiedades biológicas del suelo observando cambios estructurales significativos en las comunidades de bacterias. También FragosoServon et al. (2023), constataron el efecto de la quema de caña de azúcar en las propiedades físicas y químicas del suelo.

A su vez, se descubrió que cuando por efecto de la quema, la temperatura alcanza entre 600°C y 735°C, se esteriliza la población microbiana, (organismos formadores y fijadores de nutrientes básicos) inhibiendo la formación de materia orgánica y disminuyendo la fertilidad de los suelos (Vilaboa-Arroniz y Barroso, 2013).

Sin embargo, son escasas las investigaciones que se han enfocado en los efectos ambientales de las diferentes severidades de quema en agroecosistemas como el de la caña de azúcar. Santiago-de la Rosa et al. (2017) condujeron un estudio experimental que mostró la diferencia en la cantidad y variedad de contaminantes emitidos, entre los diferentes estadios de la quema de la caña de azúcar; concluyendo que cuanto más tiempo dure la quema mayor será la contaminación generada.

Asimismo, Junqueira et al. (2016), tras correr modelos que incluyeron varias actividades realizadas durante la producción e industrialización de la caña de azúcar, determinaron que una de las actividades de mayor costo económico y ambiental de la industria cañera es la quema de la caña de azúcar.

#### 4. Resultados

Se encontró una diferencia de 2.1 % entre las cifras reportadas por CONADESUCA (2022) sobre la superficie quemada durante la zafra 2021-2022 (72 mil 415 hectáreas), en la zona cañera que abastece a los ingenios establecidos en el estado de San Luis Potosí y las obtenidas con el análisis realizado (70 mil 942 hectáreas) (Tabla 2). La razón de esta diferencia se puede deber a la variación de las cantidades reportadas por los ingenios e incluso al cálculo de la sumatoria de las superficies; dado que incluso entre las fuentes de información oficiales existen estas diferencias. Las proporciones de las zonas de abasto de cada uno de los ingenios también es consistente con la información oficial.

El Ingenio con mayor superficie cosechada fue San Miguel del Naranjo con 32 mil 433 hectáreas, seguido por Plan de San Luis con 24 mil 900 hectáreas, Plan de Ayala con 23 mil 712 hectáreas y Alianza Popular con 22 mil 135 hectáreas (CONA-DESUCA, 2022).

No obstante, la proporción de superficie cosechada por el método de quema siguió el siguiente orden: Alianza Popular (85.1 %), Plan de Ayala (77.8 %), Plan de San Luis (65.5 %) y San Miguel del Naranjo (58.0 %); como se muestra en la Lámina 1.

Considerando que, según CONADESUCA (2022), el rendimiento en campo fue de 59.4 ton/ha para Alianza Popular, 57.2 ton/ha para Plan de Ayala, 57.5 ton/ha para Plan de San Luis y 46.8 ton/ha para San Miguel del Naranjo, así como los resultados de la superficie quemada con el análisis realizado, en la Tabla 3 se muestra el estimado de caña quemada por ingenio, durante la zafra 2021-2022.

Asumiendo una relación directa entre cantidad de biomasa quemada (ton) y la emisión de contaminantes del aire, se consi-

Tabla 1. Clasificación de los niveles de severidad de áreas quemadas, propuesto por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) / Table 1. Classification of severity levels of burned areas, proposed by the United States Geological Survey (USGS)

Rango de dNBR		Rango de dNBR (escalado a 10 <sup>3</sup> )		
Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	Límite superior	Nivel de severidad
-0.500	-0.251	-500	-251	Alto crecimiento de la vegetación posterior al fuego
-0.250	-0.101	-250	-101	Bajo crecimiento de la vegetación posterior al fuego
-0.100	0.099	-100	99	Zonas estables o sin quemar
0.100	0.269	100	269	Zonas quemadas con severidad baja
0.270	0.439	270	439	Zonas quemadas con severidad moderada-baja
0.440	0.659	440	659	Zonas quemadas con severidad moderada-alta
0.660	1.300	660	1300	Zonas quemadas con severidad alta

<sup>\*</sup>Fuente: UN, 2018.

Tabla 2. Superficie en hectáreas quemada durante la zafra 2021-2022, por ingenio / Table 2. Surface in hectares burned during the 2021-2022 harvest by sugar mill

	Alianza Popular	Plan de Ayala	Plan de San Luis	San Miguel del Naranjo
Análisis realizado	16,766	19,139	15,953	19,084
Cifras oficiales	18,843	18,454	16,306	18,814

<sup>\*</sup>Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Toneladas de caña quemada durante la zafra 2021-2022, por ingenio / Table 3. Sugarcane ton burned during the 2021-2022 harvest by sugar mill

	Alianza Popular	Plan de Ayala	Plan de San Luis	San Miguel del Naranjo
Caña quemada (ton)	1,118,897	1,055,200	937,595	880,495

<sup>\*</sup>Fuente: Elaboración propia

dera que la zona con mayor impacto es Alianza Popular, seguida por Plan de Ayala, Plan de San Luis y San Miguel del Naranjo, respectivamente. No obstante, se recomienda que, cuando se cuente con información adicional como la eficiencia del quemado y el factor de emisión, esta sea utilizada para robustecer los criterios de la evaluación.

Un caso particular es el ingenio San Miguel del Naranjo que, a pesar de tener la zona cañera más extensa del estado, realiza una proporción menor de quemas, tiene un menor rendimiento en campo y una menor severidad en sus quemas. Considerando todos estos elementos, se considera que este ingenio es el de menor impacto en la calidad del aire.

En ausencia de estudios concluyentes que muestren los efectos de las diferentes severidades de quema en agroecosistemas como el de la caña de azúcar, particularmente en la contaminación del aire, se consideró que cuanto más intensa fue una quema, duró más tiempo y consumió más biomasa, emitiendo una mayor variedad y cantidad de contaminantes (Figura 2).

Como se mencionó, los rangos de dNBR inferiores a 100, se interpretan como áreas no quemadas o con rebrotes. Tradicionalmente, la caña de azúcar en San Luis Potosí se produce en monocultivo, por lo que se asume que la superficie cultivada, se encuentra en alguna de sus etapas de desarrollo (plantilla, soca o resoca). Por ello, se deduce que las áreas no quemadas son superficies cosechadas mediante cosecha en verde o superficies no cosechadas, ya sea porque su etapa de desarrollo no ameritó

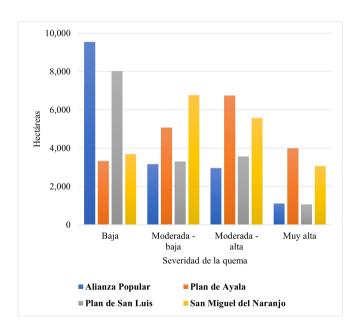


Figura 2: Grado de severidad de las quemas durante la zafra 2021-2022, por ingenio / Figure 2: Degree of severity of burns during the 2021-2022 harvest by sugar mill

su cosecha o porque no se requirió por el ingenio; no obstante, aquí se vuelve a hacer latente la necesidad de la verificación en

# Mapa de quema de caña de azúcar durante la zafra 2021 - 2022 en San Luis Potosí, México Pedro Pérez Medina, María Guadalupe Galindo Mendoza, María Teresa Sánchez Salazar y Ángel de Jesús Quiroz Gaspar <sup>1</sup>Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. <sup>2</sup> Laboratorio Nacional de Geoprocesamiento de Información Fitosanitaria, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. <sup>3</sup> Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. terra digitalis Loma Alta Leyenda Ingenios azucareros Procesamiento (ton/día) 2,520,000 Ciudad Mante Carretera federal TAMAULIPAS Ríos Zonas de abasto de los ingenios 2,500,000 Área urbana San Miguel del Naranjo Límite municipal Límite estatal Severidad de la quema en la zafra 2021/22 Baja 2,480,000 Media - baja Media - alta Muy alta

SAN LUIS

Ciudad Valles

Tancanhuitz }

500,000

Plan de Ayala

Aquismón

480,000

POTOSÍ

Tanlajás

Tamuín

Plan de San Luis

Alianza Popular

Tamasopo

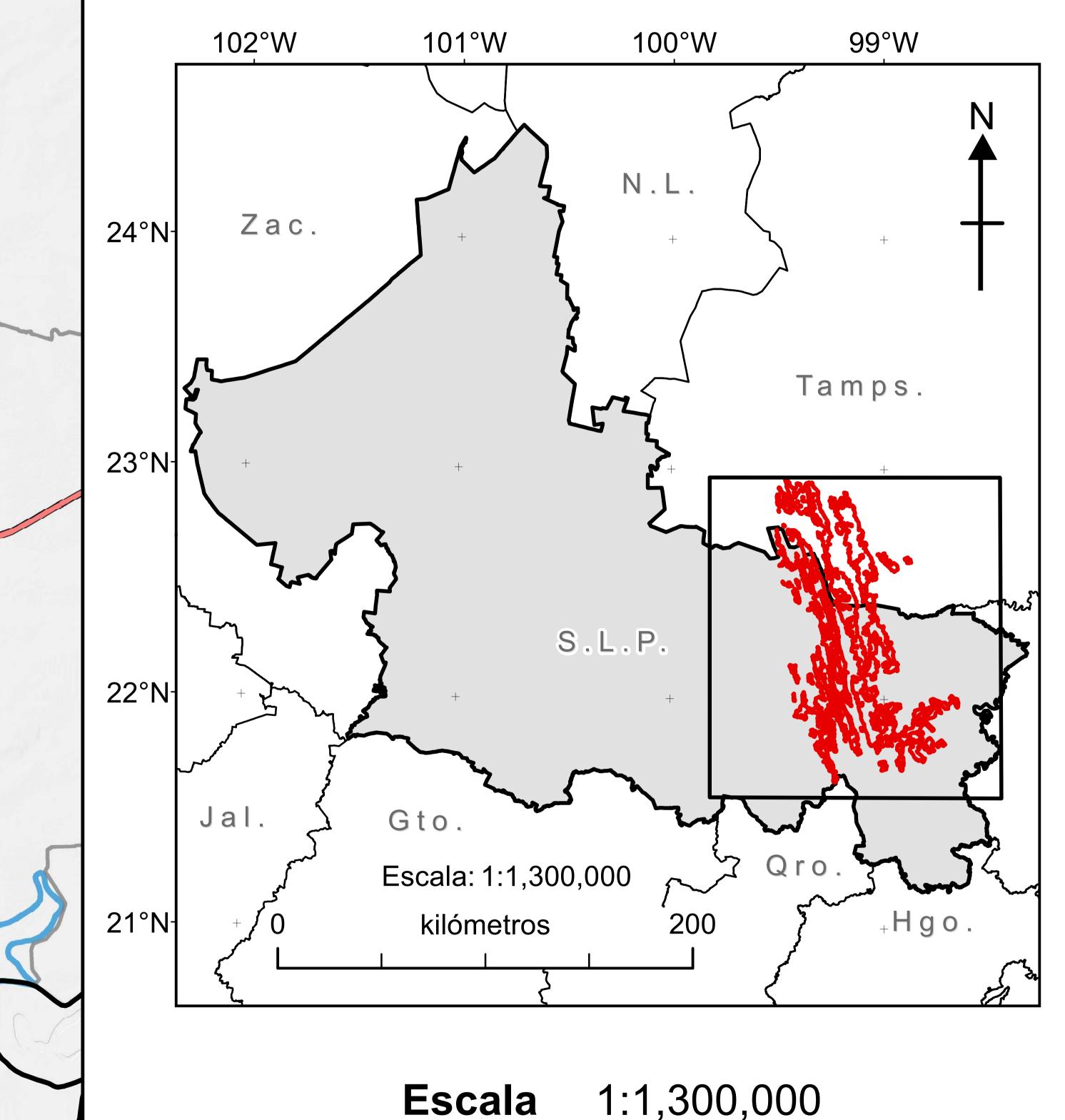
460,000

2,460,000

2,440,000

2,420,000

2,400,000



Zona\_\_\_\_\_UTM 14 Norte
Cuadrícula\_\_\_\_UTM a cada 20,000 m
Datum\_\_\_\_WGS84

Referencias cartográficas:

Proyección Universal Transversal de Mercator

WGS84 1984

kilómetros

División política, área urbana, hidrografía carreteras: INEGI, 2010 y 2022;
Zonas de abasto: CONADESUCA, 2021 y LaNGIF, 2022.
Severidad de la quema de zafra obtenida

de imágenes Sentinel-2: ESA, 2021/22.

520,000 540,000

Esferoide

campo. Por otra parte, los rebrotes pueden provenir de caña cosechada en la última etapa de la zafra anterior o en la primera etapa de la presente zafra.

Adicionalmente, recursos como las imágenes de monitoreo de la contaminación del aire, provistas en los modelos MERRA-2 (NASA, 2022), podrían complementar los resultados obtenidos, mediante correlaciones.

#### 5. Conclusiones

Una importante proporción de los terrenos cultivados con caña de azúcar, en las zonas que abastecen a los cuatro ingenios que operan en el estado de San Luis Potosí, aún mantiene la práctica de cosecha por el método de doble quema (más del 70 %), lo cual es un factor determinante en la afectación de los servicios ecosistémicos de sus recursos, particularmente la calidad del aire y la salud humana.

Existe un nexo indisoluble entre la caña de azúcar y su industria asociada, que implica una relación entre la cantidad de caña producida y su impacto ambiental. Por ejemplo, en lo referente a la contaminación del aire, la industria cañera, implica actividades que conllevan procesos de ignición de combustibles fósiles y biomasa, como el procesamiento en los ingenios y la movilidad masiva de vehículos de carga pesada.

En la etapa de producción, las prácticas realizadas determinarán el impacto en los servicios ecosistémicos, por lo cual las zonas de abasto más extensas no siempre son las más contaminantes. Una de las prácticas de mayor impacto ambiental es la cosecha por el método de doble quema, que además de afectar la calidad del aire por la emisión de una importante cantidad de contaminantes, afecta otros servicios ecosistémicos como las propiedades del suelo.

El uso de imágenes de satélite para la delimitación de áreas quemadas y sus niveles de severidad, a través de índices como el NBR, se ha difundido ampliamente para la evaluación de ecosistemas naturales y recientemente se han reportado algunas aplicaciones a agroecosistemas en donde se realiza la quema de residuos agrícolas. Sin embargo, al carecer de mayores elementos de determinación para la clasificación de los niveles de severidad, se han utilizado los establecidos por USGS.

Para soportar los niveles descritos en el mapa diseñado se valió de criterios adicionales encontrados en otras investigaciones, pero se considera que la calibración espectral, la verificación en campo, y el análisis complementario con otras imágenes de satélite puede coadyuvar en la certidumbre de los resultados para estudios subsecuentes.

La cosecha en verde constituye uno de los mayores factores en la reducción del impacto ambiental y económico de esta industria por lo que contribuiría de forma determinante en su sostenibilidad; de ahí la necesidad de su monitoreo continuo con tecnologías asequibles como la satelital.

#### **Software**

Se utilizó ArcMap 10.5 y Google Earth Engine (GEE).

#### Referencias

- Andreadis, A., Giambene, G., Zambon, R., Jun. 2022. Low-Power IoT Environmental Monitoring and Smart Agriculture for Unconnected Rural Areas. En: 2022 20th Mediterranean Communication and Computer Networking Conference (MedComNet). pp. 31–38, https://doi.org/10.1109/MedComNet55087.2022.9810376.
- Arteaga, A., 2016. Área Mínima Cartografiable/Unidad mínima cartografiable Arcgis 10.4 (Determinación de áreas en Arcgis 10.4). http://sig-geek.blogspot.com/2016/07/area-minima-cartografiable-arcgis-104.html.
- Baloloy, A. B., Blanco, A. C., Gana, B. S., Sta. Ana, R. C., Olalia, L. C., Sep. 2016. LANDSAT-BASED DETECTION AND SEVERITY ANALY-SIS OF BURNED SUGARCANE PLOTS IN TARLAC, PHILIPPINES USING DIFFERENCED NORMALIZED BURN RATIO (dNBR). The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-4-W1, 173–179, https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W1-173-2016.
- Burgos, A., Páez, R., Carmona, E., Rivas, H., Dec. 2013. A systems approach to modeling Community-Based Environmental Monitoring: a case of participatory water quality monitoring in rural Mexico. Environmental Monitoring and Assessment 185 (12), 10297–10316, https://doi.org/10. 1007/s10661-013-3333-x.
- Chen, Z., Shao, Y., He, M., Liang, J., Jiang, Y., Wang, Y., Zhou, M., Gong, Z., Zhou, X., Fang, F., Guo, J., May 2020. The EMR-rural project: key techniques and devices development for rural environmental monitoring and remediation in China. Environmental Sciences Europe 32 (1), 72, https://doi.org/10.1186/s12302-020-00343-4.
- Cocke, A. E., Fulé, P. Z., Crouse, J. E., Cocke, A. E., Fulé, P. Z., Crouse, J. E., May 2005. Comparison of burn severity assessments using Differenced Normalized Burn Ratio and ground data. International Journal of Wildland Fire 14 (2), 189–198, https://doi.org/10.1071/WF04010.
- Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONA-DESUCA), 2022. Reportes. Sistema Sinfocaña. https://www.gob.mx/conadesuca/acciones-y-programas/sistema-infocana.
- Deb, D., 2019. Here are the 10 Main Causes of Air Pollution. AQI India. https://www.aqi.in/blog/here-are-the-10-main-causes-of-air-pollution/.
- El Chami, D., Daccache, A., El Moujabber, M., 2020. What are the impacts of sugarcane production on ecosystem services and human well being? A review. Annals of Agricultural Sciences 65 (2), 188–199, https://doi.org/10.1016/j.aoas.2020.10.001.
- Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO), 2020. Emmisions due to agriculture: Global, regional and country trends 2000-2018. FAOSTAT ANALYTICAL BRIEF 18. FAO, https://www.fao.org/3/cb3808en/cb3808en.pdf.
- Fragoso-Servón, P., Pereira Corona, A., Prezas Hernández, B., Feb. 2023. Efecto de la Quema de la Caña de Azúcar (Saccharum officinarum) Sobre las Propiedades de los Suelos Agrícolas en la Zona Kárstica del Sur de Quintana Roo. European Scientific Journal, ESJ 19 (6), 330–330, https://eujournal.org/index.php/esj/article/view/16491.
- Giglio, L., Boschetti, L., Roy, D. P., Humber, M. L., Justice, C. O., Nov. 2018. The Collection 6 MODIS burned area mapping algorithm and product. Remote Sensing of Environment 217, 72–85, https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.005.
- Hidayat, M. S., Nugroho, A. P., Sutiarso, L., Okayasu, T., Nov. 2019. Development of environmental monitoring systems based on LoRa with cloud integration for rural area. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 355 (1), 012010, https://doi.org/10.1088/1755-1315/355/1/012010.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), 2022. Calidad del aire. Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire, SINAICA. https://sinaica.inecc.gob.mx/index.php.
- Jain, N., Bhatia, A., Pathak, H., 2014. Emission of Air Pollutants from Crop Residue Burning in India. Aerosol and Air Quality Research 14 (1), 422– 430, https://doi.org/10.4209/aaqr.2013.01.0031.

Junqueira, T. L., Cavalett, O., Bonomi, A., Feb. 2016. The Virtual Sugarcane Biorefinery—A Simulation Tool to Support Public Policies Formulation in Bioenergy. Industrial Biotechnology 12 (1), 62–67, https://doi.org/10.1089/ind.2015.0015.

- Keeley, J. E., Feb. 2009. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. International Journal of Wildland Fire 18 (1), 116–126, https://doi.org/10.1071/WF07049.
- Mugica-Álvarez, V., Hernández-Rosas, F., Magaña-Reyes, M., Herrera-Murillo, J., Santiago-De La Rosa, N., Gutiérrez-Arzaluz, M., de Jesús Figueroa-Lara, J., González-Cardoso, G., Nov. 2018. Sugarcane burning emissions: Characterization and emission factors. Atmospheric Environment 193, 262–272, https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.013.
- National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2022. Giovanni: The bridge between data and science v 4.38 earth data. https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/.
- National Geographic, 2022. Air Pollution. https://education.nationalgeographic.org/resource/air-pollution/.
- Pérez-Medina, P., 2022. La agroindustria cañera en México y los factores que han determinado su historia reciente (1961-2021). Revista Inclusiones 9 (Num esp), 41-70, https://revistainclusiones.org/index.php/inclu/article/view/3224.
- Pérez-Medina, P., Galindo-Mendoza, M. G., Barrera-López, V. A., Álvarez-Fuentes, G., Quiroz Gaspar, A. J., 2021. Estimación de concentraciones de carbono negro en la región noreste de México. XII Simposio Internacional del Carbono en México, virtual, México. http://pmcarbono.org/pmc/simposio/2021.php.
- Quiroz-Gaspar, A. J., Galindo-Mendoza, M. G., Pérez-Medina, P., 2022. Análisis espacio temporal de emisiones de carbono negro en regiones cañeras de México. Geotecnologías en el análisis de riesgos. Universidad Autónoma de Baja California; Universidad Autónoma de Nuevo León, http://eprints.uanl.mx/24144/.
- Quiroz, J., Pérez, P., Galindo, M. G., 2021. Análisis Espacio Temporal de Emisiones de Carbono Negro en Regiones Cañeras de México. XIV Congreso SELPER México, virtual, México. https://www.selper.org.mx/.
- Rachid, C. T. C. C., Santos, A. L., Piccolo, M. C., Balieiro, F. C., Coutinho, H. L. C., Peixoto, R. S., Tiedje, J. M., Rosado, A. S., Mar. 2013. Effect of Sugarcane Burning or Green Harvest Methods on the Brazilian Cerrado Soil Bacterial Community Structure. PLOS ONE 8 (3), e59342, https://doi.org/10.1371/journal.pone.0059342.
- Reyes-Pérez, Ö., Vázquez-Solís, V., Reyes-Hernández, H., Nicolás-Caretta, M., Rivera-González, J. G., 2012. Potencial turístico de la región Huasteca del estado de San Luis Potosí, México. Economía Sociedad y Territorio 12 (38), 249–275, https://doi.org/10.22136/est00201292.
- Santiago-De la Rosa, N., Mugica-Álvarez, V., Cereceda-Balic, F., Guerrero, F., Yáñez, K., Lapuerta, M., Nov. 2017. Emission factors from different burning stages of agriculture wastes in Mexico. Environmental Science and Pollution Research 24 (31), 24297–24310, https://doi.org/10.1007/s11356-017-0049-4.
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER), Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA), 2021. 8º Informe Estadístico del Sector Agroindustrial de la Caña de Azúcar en México. https://www.gob.mx/conadesuca/documentos/diagnosticos-regionales-de-la-agroindustria-de-la-canade-azucar-en-mexico.

- Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental (SEGAM), 2023. Calidad del Aire en San Luis Potosí. https://slp.gob.mx/segam/Paginas/Inicio.aspx.
- Secretaría de Medio Ambiente, 2022. Mapa Calidad del Aire. Http://aire.nl.gob.mx/ map\_calidad.html.
- Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET), 2022. Calidad del Aire AMG. https://aire.jalisco.gob.mx/mapaf2019.
- SEMARNAT, 2016. NORMA Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire. Diario Oficial de la Federación (DOF), publicado: 16/07/2012. https://www.dof.gob.mx/nota\_detalle.php?codigo=5259464&fecha=16/07/2012#gsc.tab=0.
- Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2022. Producción Agrícola. Cierre de la producción agrícola. https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/.
- United Nations (UN), 2018. Normalized Burn Ratio (NBR). Office for Outer Space Affairs UN-SPIDER Knowledge Portal. https://un-spider. org/advisorysupport/recommended-practices/recommendedpractice-burn-severity/in-detail/normalized-burn-ratio.
- United Nations (UN), no date. Paso a Paso: Mapeo de la Severidad de Incendios Forestales en Google Earth Engine. UN-SPIDER Knowledge Portal. Accessed: 2023, may 24. https://un-spider.org/es/asesoria/practicas-recomendadas/practica-recomendada-mapeo-gravedad-quemaduras/paso-a-paso/google-earth-engine.
- Van Dijk, D., Shoaie, S., van Leeuwen, T., Veraverbeke, S., May 2021. Spectral signature analysis of false positive burned area detection from agricultural harvests using Sentinel-2 data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 97, 102296, https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102296.
- Vilaboa-Arroniz, L., Barroso, L. A., 2013. Contaminación ambiental por quema de caña de azúcar: Un estudio exploratorio en la región central del estado de Veracruz. Think Green 2013: Crecimiento verde, retos y oportunidades para México. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, https://siiba.conadesuca.gob.mx/siiaca/Consulta/verDoc.aspx?num=358.
- World Bank (WB), Institute for Health Metrics and Evaluation University of Washington (IHME), 2016. The Cost of Air Pollution: Strengthening the Economic Case for Action. https://www.worldbank.org/.

#### This article accompanies the following material:

Static map: 10.22201/igg.25940694e.2023.1.100.225 Interactive map: 10.22201/igg.25940694e.2023.1.100.226