

Situation and regional contrasts of the Mexican sugarcane sector and its environmental impact: the case of black carbon

Pedro Pérez Medina^{1*}
María Guadalupe Galindo Mendoza²

Abstract

The sugarcane sector is deeply rooted in Mexico where it enjoys great social and economic importance. However, it is immersed in a multifactorial crisis that manifests itself in the closure of sugar mills and loss of productivity. In addition, the sector has a high environmental and human health impact. The production and industrialization of sugarcane releases various air pollutants, including black carbon, which is considered the main indicator of air quality. During COP21, Mexico set itself the unconditional target of reducing its black carbon emissions by 51 % by 2030 compared to 2013. The aim of this study was to analyze the evolution of black carbon emissions during the last decade (2013-2023) using the emission factor methodology and to verify its contribution to national commitments in order to provide decision-makers with evidence to define appropriate corrective measures. In addition, the trend of some production indicators and their association with the evolution of emissions was analyzed. The results show that the sector reduced its black carbon emissions by 22.5 % during the period analyzed, an insufficient rate to effectively contribute to achieving the targets set by the country. The reduction in emissions was more related to the decrease in sugarcane production caused by productivity losses and recurring droughts than to works and actions focused on achieving cleaner production.

Keywords: Sugar mills, supply zones, multifactorial crisis, heterogeneous conditions, differences, air pollution.

Situación y contrastes regionales del sector cañero azucarero mexicano y su impacto ambiental: el caso del carbono negro

Resumen

El sector cañero azucarero goza de arraigo e importancia social y económica en México. Sin embargo, se encuentra sumergido en una crisis multifactorial manifestada por el cierre de ingenios y pérdida de productividad, además de un alto impacto ambiental y en la salud humana. Durante la producción e industrialización de la caña de azúcar se emiten varios contaminantes del aire; uno de ellos es el carbono negro, considerado el principal indicador de la calidad del aire. Durante la COP21, México estableció una meta no condicionada de reducción del 51 % sus emisiones de carbono negro para el año 2030, con respecto a 2013. El objetivo de esta investigación fue analizar la evolución de las emisiones de carbono negro durante la última década (2013-2023), mediante el uso del método de factor de emisiones y verificar su contribución a los compromisos nacionales, con el fin de proporcionar elementos a los tomadores de decisiones para establecer las medidas correctivas correspondientes. Además, se analizó la tendencia de algunos indicadores productivos y su asociación con la evolución de las emisiones. Los resultados mostraron una reducción de sus emisiones de carbono negro de 22.5 % durante el periodo de análisis, tasa insuficiente para contribuir efectivamente al logro de las metas establecidas por el país. La reducción de las emisiones estuvo asociada con descensos en la producción de caña, ocasionados por decrementos en la productividad y recurrentes sequías, más que con la implementación de obras y acciones en favor de una producción más limpia.

Palabras clave: Ingenios azucareros, zonas de abasto, crisis multifactorial, condiciones heterogéneas, contaminación del aire.

¹Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales, Ave. Manuel Nava núm. 201, 2do. Piso, Zona Universitaria, C. P. 78000, San Luis Potosí, S. L. P. México.

²Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Laboratorio Nacional de Geoprocamiento de Información Fitosanitaria. Coordinación para la Innovación y Aplicación de la Ciencia y la Tecnología, Ave. Sierra Leona núm. 550-2a. Lomas de San Luis, Potosí, C. P. 78210, San Luis Potosí, S. L. P. México.

*Corresponding author: A35047@alumnos.uaslp.mx Tel: 4448262300 Ext. 8456, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-9746-8037>

Introduction

Sugarcane is Mexico's fifth largest agricultural product by harvested area, and the third by volume and value of production, competing with crops such as corn and avocado (SIAP, 2023). It generates annual income of 47 billion pesos and is grown on approximately 800 thousand hectares in 267 municipalities and 14 states. In addition, the 49 sugar mills that operated during the 2020/21 harvest were supplied by 170 thousand producers and generated 440 thousand direct jobs and 2.2 million indirect jobs (SADER, 2021).

Mexico's sugarcane sector is undergoing a historical, chronic and multifactorial crisis characterized by low productivity, mills with obsolete technology and poor-quality production (Martínez, 2023; Solleiro et al., 2020). This is compounded by high costs and limited diversification of production (Aguilar Rivera et al., 2015).

One indicator of this situation is the gradual closure of mills: during the last 20 years, 12 of 60 mills ceased operations (CEFP, 2001) and in the last decade alone, on average one mill was closed every two years.

Nevertheless, the sector has managed to maintain its economic and social importance due to the incorporation of land for crop production, with all the negative environmental and human health impacts that this implies (Pérez Medina, 2022).

On the other hand, by developing under a diversity of natural, social, political and economic conditions, the sector has become heterogeneous: while some regions are in clear decline, others are experiencing an unusual boom.

One resource particularly affected by the sector is air, since the biomass and oil derivatives' combustion processes conducted in the sector emit a variety of pollutants (Le Blond et al., 2017). It should also be pointed out that in 96 % of cases, one or more cultivation tasks are performed using agricultural machinery, and 87.4 % of the harvest is carried out by the double burning method. In addition, mills burn sugarcane bagasse and fuel oil, which they use as their main energy inputs. Moreover, during the harvest season, there is an increase in heavy vehicle traffic for transporting sugarcane from the fields to the

Introducción

La caña de azúcar es el quinto producto agrícola de México por superficie cosechada, y el tercero por volumen y valor de la producción, compitiendo con cultivos como el maíz y aguacate (SIAP, 2023). Genera ingresos anuales por 47 mil millones de pesos y se cultiva en aproximadamente 800 mil hectáreas de 267 municipios y 14 entidades federativas. Además, los 49 ingenios que operaron durante la zafra 2020/21 fueron abastecidos por 170 mil productores y generaron 440 mil empleos directos y 2.2 millones de empleos indirectos (SADER, 2021).

El sector cañero azucarero de México atraviesa por una crisis histórica, crónica y multifactorial caracterizada por baja productividad, ingenios con tecnología obsoleta y producción de mala calidad (Martínez, 2023; Solleiro et al., 2020). A esto, se añaden los altos costos y la escasa diversificación de la producción (Aguilar Rivera et al., 2015).

Un indicador de esta situación es el cierre paulatino de ingenios: durante los últimos 20 años, 12 de 60 ingenios dejaron de operar (CEFP, 2001) y tan solo en la última década, en promedio se cerró un ingenio cada dos años.

No obstante, el sector ha logrado mantener su importancia económica y social por la incorporación de superficies para la producción del cultivo, con todos los impactos negativos, ambientales y a la salud humana, que ello implica (Pérez Medina, 2022).

Por otra parte, al desarrollarse bajo una diversidad de condiciones naturales, sociales, políticas y económicas, el sector se ha tornado heterogéneo: en tanto que algunas regiones se encuentran en franca decadencia, otras experimentan un auge inusitado.

Un recurso particularmente afectado por el sector es el aire, ya que los procesos de combustión de biomasa y derivados de petróleo, generados en el sector, emiten una diversidad de contaminantes (Le Blond et al., 2017). Lo anterior, dado que en 96 % de los casos, una o más labores de cultivo se realizan utilizando maquinaria agrícola, y 87.4 % de la cosecha se realiza por el método de doble quema. Asimismo, los ingenios queman bagazo de caña y combustóleo, los cuales utilizan como sus principales insumos energéticos. Adicionalmente, durante la temporada de zafra se incrementa el tráfico de vehículos

mills and, subsequently, the sugar to its processing or distribution points. During the six months of the 2022/23 harvest alone, more than 16 000 of these vehicles were mobilized (CONADESUCA, 2023).

One of the main air pollutants emitted is black carbon (BC), a carbonaceous aerosol classified as a short-lived climate pollutant (SLCP), capable of retaining light, transforming it into heat and causing atmospheric warming, as well as alterations in climate patterns (Manzini et al., 2022). Direct exposure of the population to BC also has negative health effects, as it is related to respiratory (Paunescu et al., 2019), cardiovascular (Burroughs Peña and Rollins, 2017) and kidney (Chaudhuri et al., 2017) diseases, among others. Environmentally, it is the second most potent agent of climate change (Solomon & Manning, 2018), and since it has a short atmospheric lifetime, reducing its emissions constitutes an efficient strategy to reduce global warming (Bond et al., 2013).

Given this scenario, Mexico, during COP21 in 2015, set an unconditional target of reducing its greenhouse gas (GHG) emissions by 22 % and BC by 51 %, by 2030, compared to 2013 (Gobierno de México, 2015). Thus, its GHG emissions should be decreasing at an annual rate of 1.3 % and those of BC by 3.0 %.

To assess progress in this area, since 2018 the National Institute of Ecology and Climate Change (INECC) has been preparing the National Inventory of Greenhouse Gas and Compound Emissions (INEGYCEI) to estimate emissions of the six GHGs included in Annex A of the Kyoto Protocol: carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4), nitrous oxide (N_2O), hydrofluorocarbon (HFC), perfluorocarbons (PFC) and sulfur hexafluoride (SF_6), in addition to BC, by sources and sinks, for the four emission sectors defined by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC): (1) Energy, (2) Industrial Processes, (3) Agriculture, Forestry and other land uses, and (4) Waste (SEMARNAT and INECC, 2018).

The INECC uses the emissions factor method to prepare the INEGYCEI and presents the results by sector, making it difficult to know the emissions trend of the different subsectors that make up each sector, such as sugarcane production and industrialization, as well as their contributions and variations in the different sugarcane regions of the country.

pesados que transportan la caña de las parcelas a los ingenios y posteriormente, el azúcar a sus puntos de procesamiento o distribución. Solo durante los seis meses que duró la zafra 2022/23, se movilizaron más de 16 000 de estos vehículos (CONADESUCA, 2023).

Uno de los principales contaminantes del aire emitidos es el carbono negro (BC), un aerosol carbonoso, contaminante de vida corta (CCVC), capaz de retener la luz, transformarla en calor y provocar calentamiento atmosférico, así como alteraciones en los patrones climáticos (Manzini et al., 2022). La exposición directa de la población al BC también tiene efectos negativos en la salud, ya que se relaciona con enfermedades respiratorias (Paunescu et al., 2019), cardiovasculares (Burroughs Peña y Rollins, 2017) y renales (Chaudhuri et al., 2017), entre otras. En lo ambiental, es el segundo agente más potente de cambio climático (Solomon y Manning, 2018), y al tener una vida atmosférica corta, la reducción de sus emisiones constituye una estrategia eficiente para disminuir el calentamiento global (Bond et al., 2013).

Ante este escenario, México durante la COP21 de 2015, se fijó una meta no condicionada de reducción de sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en 22 % y de BC en 51 %, para el año 2030, con respecto al 2013 (Gobierno de México, 2015). De esta forma, sus emisiones de GEI deberían estar decreciendo a una tasa anual de 1.3 % y las de BC en 3.0 %.

Para evaluar los avances en esta materia, desde el año 2018 el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) elabora el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI), para estimar las emisiones de los seis GEI incluidos en el Anexo A del Protocolo de Kioto: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbono (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6), además del BC; por fuentes y sumideros, para los cuatro sectores de emisión definidos por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés): (1) Energía, (2) Procesos Industriales, (3) Agricultura, Silvicultura y otros usos de la tierra y (4) Residuos (SEMARNAT e INECC, 2018).

El INECC utiliza el método de Factor de Emisiones para la elaboración del INEGYCEI y presenta los resultados por sector, por lo cual es difícil conocer

This study is part of an investigation into the Mexican sugarcane sector's BC emissions and impacts in which, in addition to comparing the results obtained with different monitoring methods, the affected ecosystem services and their economic valuation will be determined.

Methodological approach

Study Area

The study area is the sugarcane-growing region of Mexico, made up of 267 municipalities in 14 states in the coastal and inland areas of the country, which have warm and humid climates that allow the crop to develop (Figure 1).

Although there are particularities in the production and industrialization systems in the different sugarcane areas and even from mill to mill, it is considered that the decisive factor in productivity is the availability of irrigation, so the main difference in crop productivity is found in its regime: irrigation or rainfed (Aguilar Rivera, et al., 2015).

la tendencia de las emisiones de los diferentes subsectores que integran a cada sector, como el de la producción e industrialización de la caña de azúcar, así como sus aportaciones y variaciones por las diferentes regiones cañeras del país.

Este estudio forma parte de una investigación sobre la emisión e impactos del BC del sector cañero azucarero de México en el cual, además de comparar los resultados obtenidos con diferentes métodos de monitoreo, se determinarán los servicios ecosistémicos afectados y su valoración económica.

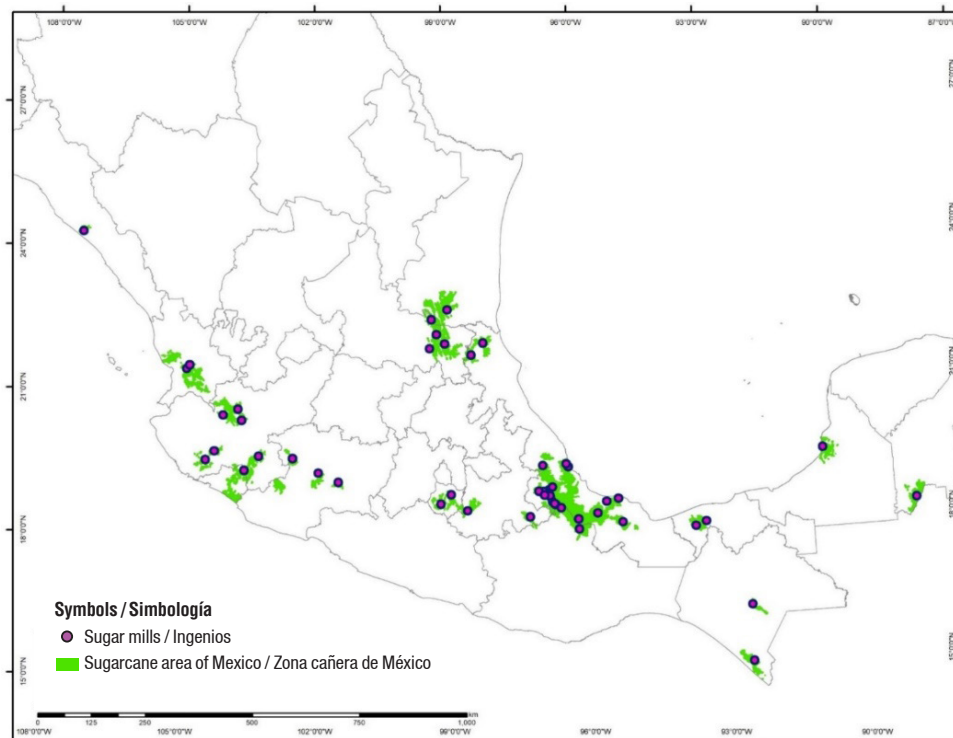
Enfoque Metodológico

Área de Estudio

El área de estudio es la zona cañera de México, conformada por 267 municipios en 14 entidades federativas en las zonas costeras e interiores del país, que cuentan con climas cálidos y húmedos que permiten el desarrollo del cultivo (Figura 1).

Aunque existen particularidades en los sistemas de producción e industrialización en las diferentes

Figure 1. Sugar mills and supply areas in Mexico.
Figura 1. Ingenios azucareros y zonas de abasto en México.



Analysis by region

For the analysis, the regionalization established by CONADESUCA was used and, due to the proximity and compactness of the areas, the Cordoba-Gulf and Papaloapan-Gulf regions were merged.

The variables included for the estimation of BC emissions were: tons of raw milled sugarcane, percentage of sugarcane harvested by the burning method, and tons of sugarcane bagasse and liters of fuel oil used by the mills. Additionally, other productive variables such as hectares harvested, field yield ($t \cdot ha^{-1}$), agricultural yield ($t \cdot ha^{-1}$) and tons of sugar produced were used to analyze the evolution of the sector during the period and its relationship with the environmental impact generated.

Estimation of BC emissions from the sugarcane sector in Mexico

To estimate BC emissions, the emissions factor method was used, which defines an emission factor as the relationship between the amount of pollutants emitted into the atmosphere and a unit of activity (INECC, 2020) and is used by the INECC for the preparation of the INEGYCEI. Its general formula (1) is:

$$E_{CN} = DA * FE_{CN} * \left(\frac{100-n}{100} \right) \quad (1)$$

Where:

E_{CN} is the soot or black carbon emission from activity A in kilograms.

DA is the activity or magnitude on which the calculation of the GYCEI emission is based, given in units of the activity.

FE_{CN} is the soot or black carbon emission factor for activity A, given in kilograms of black carbon per activity units.

N is the efficiency of the control systems or equipment by type of GYCEI, if these are installed and operating, and is given as a percentage.

For emissions from sugarcane burning, the following considerations were taken into account:

DA is the sugarcane processed, given in tons of raw sugarcane milled by the mills that operated during the 2012/13 to 2022/23 harvests. The information was retrieved from the Sinfocaña

zonas cañeras y aún, de ingenio a ingenio, se considera que el factor decisivo en la productividad es la disponibilidad de riego, así que la principal diferencia en la productividad de los cultivos se encuentra en su régimen: riego o temporal (Aguilar Rivera, et al., 2015).

Análisis por región

Para el análisis se utilizó la regionalización establecida por CONADESUCA y, por cercanía y compactación de áreas, se fusionaron las regiones Córdoba-Golfo y Papaloapan-Golfo.

Las variables incluidas para la estimación de emisiones de BC fueron: toneladas de caña molida bruta, porcentaje de caña cosechada por el método de quema, toneladas de bagazo de caña y litros de combustóleo, utilizados por los ingenios. Adicionalmente, se utilizaron otras variables productivas como hectáreas cosechadas, rendimiento en campo ($t \cdot ha^{-1}$), rendimiento agroindustrial ($t \cdot ha^{-1}$) y toneladas de azúcar producidas, para analizar la evolución del sector durante el periodo y su relación con el impacto ambiental generado.

Estimación emisiones de BC del sector cañero en México

Para la estimación de las emisiones de BC se utilizó el método de Factor de Emisiones, que define un factor de emisión como la relación que existe entre la cantidad de contaminantes emitidos a la atmósfera y una unidad de actividad (INECC, 2020) y es utilizado por el INECC para la elaboración del INEGYCEI. Su fórmula general (1) es:

$$E_{CN} = DA * FE_{CN} * \left(\frac{100-n}{100} \right) \quad (1)$$

Donde:

E_{CN} es la emisión de hollín o carbono negro de la actividad A en kilogramos.

DA es la actividad o magnitud sobre la cual se basa el cálculo de la emisión de GYCEI, dada en unidades de la actividad.

FE_{CN} es el factor de emisión de hollín o carbono negro para la actividad A, dado en kilogramos de carbono negro por unidades de actividad.

N es la eficiencia de los sistemas o equipo de control por tipo de GYCEI, si estos se encuentran instalados y operando, y es dada en porcentaje.

Information System databases (CONADESUCA, 2023). Subsequently, a proportion factor was applied for the sugarcane that was harvested by the burning method, and the burnt residue parameters for sugarcane cultivation considered by INECC (Mugica Álvarez, 2016) were taken into account. Performing the corresponding calculation, the resulting proportion is 0.115992.

FE_{CN} is the emission factor for sugarcane: 0.37 (Mugica Álvarez, 2016).

N are improvements in the efficiency of production systems; in this case it was valued as 0, since there is no conclusive information on widespread improvements in production and industrial systems at the national level.

Assuming the above considerations, Formula (1) was simplified, and Formula (2), which was used for the estimation, was created:

$$E_{CNCA} = A * FE_{CN} \quad (2)$$

In the case of sugar mills, considering the two main fuels used, formula (1) was adapted to arrive at formula (3), which was used to estimate their emissions:

$$E_{CNI} = DA_{fuel\ oil} * FE_{fuel\ oil} + DA_{sugarcane} * FE_{sugarcane} \quad (3)$$

Where:

DA is the fuel oil used by the mill during the harvest, given in cubic meters.

FE is the fuel oil emission factor for BC, for thermal energy production, provided in AP-42: Compilation of Air Emissions Factors (EPA, 2022).

DA is the sugarcane bagasse used by the mill during the harvest, given in tons (CONADESUCA, 2023).

FE is the sugarcane bagasse emission factor for BC, for thermal energy production, provided in AP-42 (EPA, 2022).

Given the above, formula (4) was used to estimate the total BC emission of the sugar sector.

$$E_{BCt} = E_{CNCA} + E_{CNI} \quad (4)$$

Para las emisiones por la quema de caña de azúcar se tomaron las siguientes consideraciones:

DA es la caña de azúcar procesada, dada en toneladas de caña molida bruta por los ingenios que operaron durante las zafas 2012/13 a 2022/23. La información se recuperó de las bases de datos del Sistema de Información Sinfocaña (CONADESUCA, 2023). Posteriormente se aplicó un factor de proporción por la caña que fue cosechada por el método de quema, y se consideraron los parámetros de residuos quemados para el cultivo de caña de azúcar que considera el INECC (Mugica Álvarez, 2016). Realizando el cálculo correspondiente, la proporción resultante es de 0.115992.

FE_{CN} es el factor de emisión para caña de azúcar: 0.37 (Mugica Álvarez, 2016).

N son las mejoras en la eficiencia de los sistemas de producción; en este caso se valoró como 0, ya que no se cuenta con información concluyente sobre mejoras generalizadas en los sistemas productivo e industrial, a nivel nacional.

Asumiendo las consideraciones anteriores, se simplificó la Fórmula (1), y se originó la fórmula (2) que se utilizó para la estimación:

$$E_{CNCA} = A * FE_{CN} \quad (2)$$

Para el caso de los ingenios azucareros, considerando los dos principales combustibles utilizados, se adecuó la fórmula (1), para llegar a la fórmula (3), que se utilizó para la estimación de sus emisiones:

$$E_{CNI} = DA_{combustóleo} * FE_{combustóleo} + DA_{caña\ de\ azúcar} * FE_{caña\ de\ azúcar} \quad (3)$$

Donde:

DA es el combustóleo utilizado por el ingenio durante la zafra, dado en metros cúbicos.

FE es el factor de emisión del combustóleo para BC, para la producción de energía térmica, provisto en la AP-42: Compilation of Air Emissions Factors (EPA, 2022).

Spatial representation of BC emissions

The BC emissions during the 2022/23 harvest were represented on regional maps, in which the spatial variations of the area of each sugarcane region and its BC emissions can be visualized and interpreted.

To this end, the documents of the Digitalization of the Sugarcane Field in Mexico to Achieve Precision Sugarcane Agriculture program (SAGARPA, 2009) were used as a basis. To prepare the sugarcane area register, cartographic information from the 10th Statistical Report of the Sugarcane Agro-industrial Sector in Mexico (CONADESUCA, 2023) was considered. To obtain the georeferenced register, with high spatial resolution images (Sentinel-2), updated to the year 2022, visual, digital and spectral interpretation of the base information was performed. A supervised classification was then carried out, as well as band combinations.

The BC variations were divided into ranges of 1 000 tons, which is the approximate difference between the emissions of one region and another.

Results and discussion

Results

The constant increase in the national sugarcane area during recent decades has slowed down in recent years, due to, among other factors, the instability of sugar prices and variable weather conditions, mainly precipitation.

The period analyzed was characterized by constant changes, both in area and yields obtained, which is why we analyzed both the variation of the final harvest (2022/23) with respect to the initial one (2012/13), as well as the average annual variation. During the period, the harvested area showed 3.3 % growth with an average annual growth rate of 0.3 %. This trend was not homogeneous since while some regions increased their sugarcane area considerably, such as the Northeast and Southeast, which grew by 28.4 and 18.5 %, respectively, there were other regions that shrank, such as the Northwest which decreased by 63.8 % (Figure 2).

On the other hand, there was a 21.9 % reduction in field productivity at the national level, going from 81.4 t·ha⁻¹ to 63.5 t·ha⁻¹, which implied that, on average, 2.3 % of the yield was lost each year.

DA es el bagazo de caña de azúcar utilizado por el ingenio durante la zafra, dado en toneladas (CONADESUCA, 2023).

FE es el factor de emisión del bagazo de caña de azúcar para BC, para la producción de energía térmica, provisto en la AP-42 (EPA, 2022).

Dado lo anterior, para la estimación del BC total del sector azucarero se utilizó la fórmula (4).

$$E_{BCt} = E_{CNCA} + E_{CNI} \quad (4)$$

Representación espacial de las emisiones de BC

La representación de las emisiones durante la zafra 2022/23 se realizó en mapas regionales, en los cuales se pueden visualizar e interpretar las variaciones espaciales de la superficie de cada región cañera y sus emisiones de BC.

Con este fin, se utilizó como base los documentos del programa Digitalización del Campo Cañero en México para Alcanzar la Agricultura de Precisión de la Caña de Azúcar (SAGARPA, 2009). Para la elaboración del padrón de la superficie cañera se consideró la información cartográfica del 10° Informe Estadístico del Sector Agroindustrial de la Caña de Azúcar en México (CONADESUCA, 2023). Para la obtención del padrón georreferenciado, con imágenes de alta resolución espacial (Sentinel-2), actualizado al año 2022, se realizó interpretación visual, digital y espectral de la información base. Posteriormente se realizó una clasificación supervisada, así como combinaciones de bandas.

Las variaciones de BC se dividieron en rangos de 1 000 toneladas, que es la diferencia aproximada que existe entre las emisiones de una región y otra.

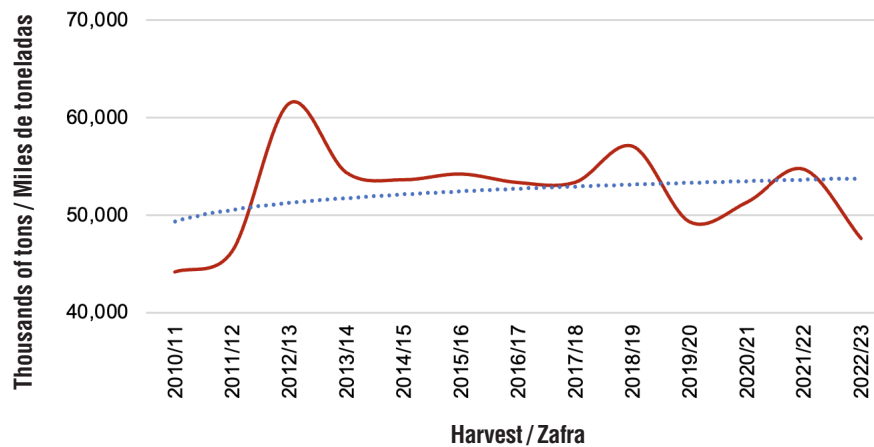
Resultados y discusión

Resultados

El constante incremento suscitado en la superficie cañera nacional durante las últimas décadas se ha ralentizado en los últimos años, entre otros factores, por la inestabilidad de los precios del azúcar y las condiciones meteorológicas variantes, principalmente la precipitación.

El periodo analizado se caracterizó por constantes cambios, tanto en superficie, como

Figure 2. Sugarcane production in Mexico.
Figura 2. Producción de caña de azúcar en México.



All regions showed decreases, in some cases as significant as in the Northeast region, which lost 46.3 %, maintaining its place as the least productive sugarcane region in the country.

The downward trend in productivity was partially compensated by the incorporation of new area for sugarcane production, allowing it to continue growing (Figure 3).

In Mexico, a direct relationship has developed between the size of the sugar consortia and their propensity to expand, which has led to a gradual increase in large landownership. These companies are mainly suppliers to soft drink companies, as well as wholesale and retail suppliers to large supermarket chains such as Walmart. Some of these consortia have begun to produce their own sugar in order to stop depending on producers (Varillas and Castro, 2022).

Regarding the impact on the environment and human health, for the 2022/23 harvest, the sector generated 20 thousand 412 tons of BC, which represents a reduction of 22.5 % compared to 2012/13, and an average annual decrease of 2.2 % (Figure 4). Two-thirds of the decrease in emissions were related to changes in the amount of sugarcane produced.

The impact of the mills and their supply areas is similar in magnitude to their production and processing volume, given that they do not have

en rendimientos obtenidos, por lo que se analizó tanto la variación de la zafra final (2022/23) con respecto a la inicial (2012/13), como la variación promedio anual. Durante el periodo, la superficie cosechada mostró un crecimiento de 3.3 % con una tasa de crecimiento promedio anual de 0.3 %. Esta tendencia no fue homogénea ya que, mientras algunas regiones incrementaron su superficie cañera de forma considerable como la Noreste y la Sureste, que crecieron en 28.4 y 18.5 %; hubo otras regiones como la Noroeste que se redujo en 63.8 % (Figura 2).

Por otra parte, hubo una reducción en la productividad en campo a nivel nacional de 21.9 %, al pasar de 81.4 t·ha⁻¹ a 63.5 t·ha⁻¹, lo que implicó que, en promedio, cada año se perdió 2.3 % del rendimiento.

Todas las regiones mostraron decrementos, en algunos casos tan significativos como en la región Noreste que al perder 46.3 %, manteniéndola como la región cañera menos productiva del país.

La tendencia a la baja en la productividad se compensó de forma parcial con la incorporación de superficie para la producción de caña y permitir que continuara creciendo (Figura 3).

En el país se ha gestado una relación directa entre el tamaño de los consorcios azucareros y su propensión a extenderse, lo que ha propiciado que paulatinamente se acentúe el latifundismo. Estas empresas son principalmente, proveedoras

Figure 3. Variation in sugarcane area and yield in Mexico.
Figura 3. Variación en la superficie y rendimiento de caña de azúcar en México.

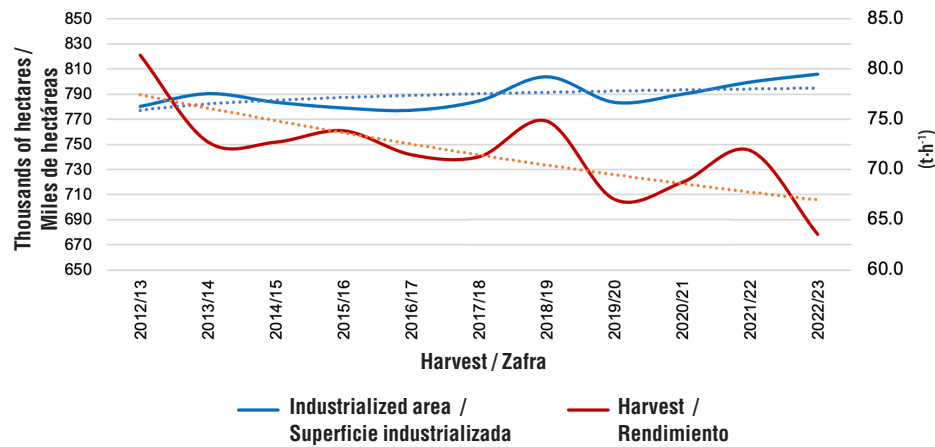
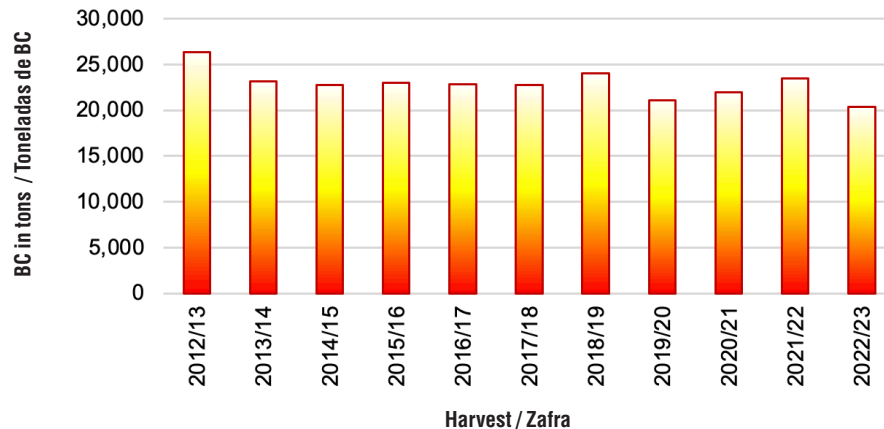


Figure 4. BC emissions from Mexico's sugarcane sector.
Figura 4. Emisiones de BC por el sector cañero azucarero de México.



substantial differences in terms of improvements in their processes for cleaner production (Quintana Quintalán, 2021). During the period, harvesting by the burning method was reduced by 6.9 %, with an average annual rate of decrease of 0.4 %, but this practice still predominates in 88.5 % of cases (Figure 5).

The reduced use of oil in industrial processes has not had a significant impact on BC generation, since the main source of pollution is the bagasse used by the mills, which causes 91.4 % of emissions (Figure 6).

However, among the sugarcane regions and even among the sugar mills within them, there are differences in technical-productive trends that have

de refresqueras, así como surtidoras al mayoreo y menudeo de grandes cadenas de supermercados como Walmart. Algunos de estos consorcios han comenzado a producir su propia azúcar para dejar de depender de los productores (Varillas y Castro, 2022).

En lo referente al impacto ambiental y salud humana, para la zafra 2022/23 el sector generó 20 mil 412 toneladas de BC, lo que representa una reducción de 22.5 % con respecto a 2012/13, y un decrecimiento promedio anual de 2.2 % (Figura 4). Dos terceras partes del descenso de las emisiones se relacionaron con cambios en la cantidad producida de caña.

Figure 5. Percentage of production harvested by the burning method during the 2022/23 harvest, by state.

Figura 5. Porcentaje de la producción cosechada por el método de quema durante la zafra 2022/23, por estado.

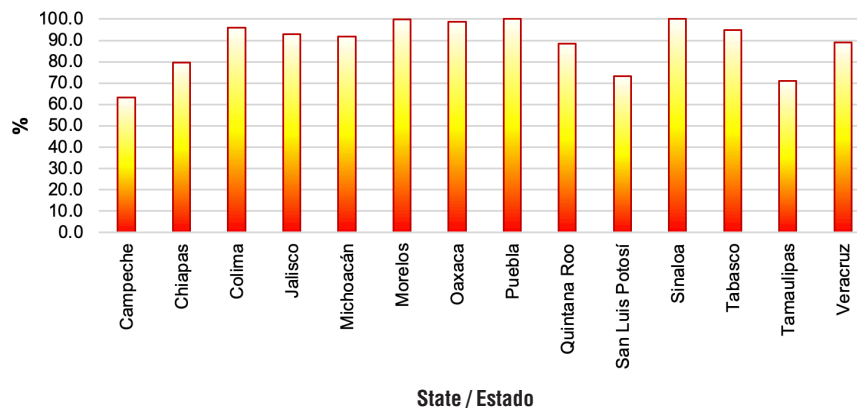
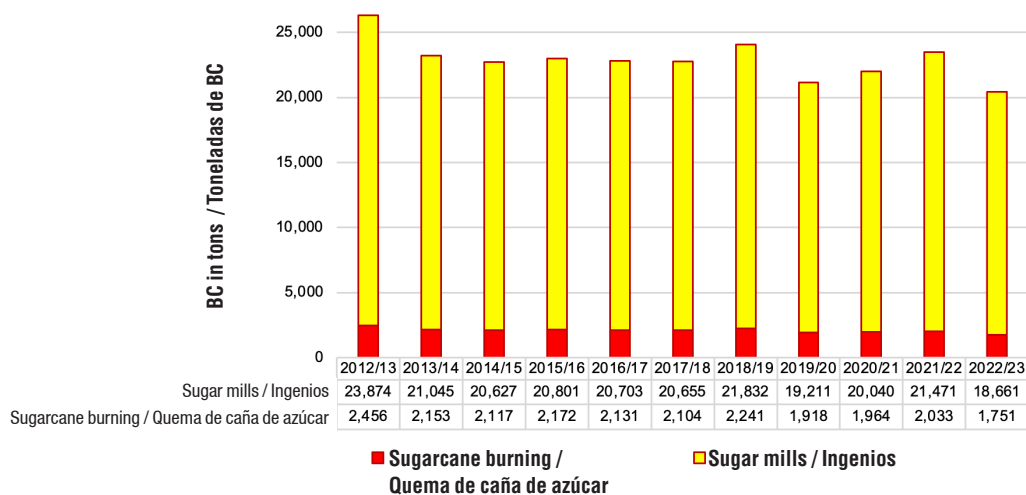


Figure 6. BC emissions of the Mexican sugarcane sector from sugarcane burning and sugar mills.

Figura 6. Emisiones de BC del sector cañero azucarero de México proveniente de la quema de caña de azúcar y de los ingenios.



become contrasts, both from a productive and environmental point of view. Table 1 summarizes some of these.

The **Northeast Region** is the second largest sugarcane-producing area in the country and produces one-fifth of its sugar. One of its mills, the Aarón Sáenz Garza in Tamaulipas, ceased operating for a period of time. Its owners are part of the largest sugar consortia in the country and foreign investment has begun to take over some of their mills: in 2011 the Guatemalan company Pantaleón acquired Pánuco de Veracruz and in 2020 El Mante de Tamaulipas.

Its sugar mills are located in one of the two sugarcane areas that, according to CONADESUC

El impacto de los ingenios y sus zonas de abasto es de magnitud similar a su volumen de producción y procesamiento, dado que no cuentan con diferencias sustanciales en lo referente a mejoras en sus procesos para una producción más limpia (Quintana Quintalán, 2021). Durante el periodo se redujo la cosecha por el método de quema en 6.9 %, con una tasa promedio anual de decrecimiento de 0.4 %, pero aún predomina esta práctica en 88.5 % de los casos (Figura 5).

La reducción en el uso de petróleo en los procesos industriales no ha impactado de forma significativa en la generación de BC, ya que la principal fuente de contaminación es el bagazo utilizado por los ingenios, que causa 91.4 % de las emisiones (Figura 6).

Table 1. Parameters and indicators of Mexico's sugarcane regions.
Cuadro 1. Parámetros e indicadores de las regiones cañeras de México.

Region / Región	Sugar (t) / Azúcar (t)	Oil (l) / Petróleo (l)	Field yield (t-ha ⁻¹) / Rendimiento campo	Agro- industrial yield (t-h ⁻¹) / Rendimiento agroindustrial (t-h ⁻¹)	Sugarcane (t) / Caña (t)	Hauling vehicles (No.) / Vehículos acarreo (núm.)	Area (ha) / Superficie (ha)	Sugarcane burned (%) / Caña quemada (%)	Sugarcane burned (t) / Caña quemada (t)	Burned area (ha) / Superficie quemada (ha)	BC emissions (t) / Emisiones de CN (t)
2012/13 Harvest / Zafra 2012/13											
Northeast / Noreste	1,371,638	14,018,161	76.9	9.1	11,604,928	2,454	152,182	85.6	9,850,300	129,634	4,965
Gulf / Golfo	2,666,296	49,529,325	76.8	8.2	24,187,036	7,625	326,166	86.0	22,901,221	308,286	10,484
Southeast / Sureste	817,256	868,066	70.4	7.5	7,737,456	2,274	107,876	95.5	7,353,835	98,313	3,378
Central / Centro	490,233	5,165,534	115.2	15.3	3,734,709	1,060	32,290	97.0	3,593,655	31,075	1,532
Pacific / Pacífico	1,224,128	4,412,172	97.2	11.5	10,375,629	1,800	108,734	93.6	9,702,412	101,471	4,315
Northwest / Noroeste	405,247	5,037,088	72.1	7.3	3,907,901	901	53,005	99.9	3,902,508	52,933	1,655
TOTAL	6,974,799	79,030,346	84.8	9.8	61,547,659	16,114	780,254	558	57,303,931	721,713	26,330
2022/23 Harvest / Zafra 2022/23											
Northeast / Noreste	936,794	453,400	44.3	4.9	8,635,375	2,764	195,373	70.7	5,994,991	135,797	3,400
Gulf / Golfo	1,939,008	9,830,537	59.0	6.1	18,462,338	7,432	320,695	93.5	17,004,981	295,202	7,603
Southeast / Sureste	773,504	0	61.3	6.5	7,397,169	2,332	127,811	83.4	6,200,654	107,364	3,189
Central / Centro	424,011	0	95.6	12.4	3,279,428	953	34,008	99.9	3,276,306	33,973	1,412
Pacific / Pacífico	1,011,996	0	78.1	9.1	5,263,615	1,738	109,130	92.9	4,880,717	101,087	3,450
Northwest / Noroeste	138,934	0	62.2	7.0	1,173,271	223	19,176	50.0	283,305	4,427	458
TOTAL	5,224,248	10,283,937	66.7	7.7	44,211,196	15,442	806,193	81.7	37,640,954	677,850	19,513
Percentage change / Variación porcentual											
Northeast / Noreste	-31.7	-96.8	-42.3	-46.3	-25.6	12.6	28.4	-17.4	-39.1	4.8	-31.5
Gulf / Golfo	-27.3	-80.2	-23.2	-26.0	-23.7	-2.5	-1.7	8.7	-25.7	-4.2	-27.5
Southeast / Sureste	-5.4	-100.0	-12.9	-12.9	-4.4	2.6	18.5	-12.7	-15.7	9.2	-5.6
Central / Centro	-13.5	-100.0	-17.0	-19.0	-12.2	-10.1	5.3	2.9	-8.8	9.3	-7.8
Pacific / Pacífico	-17.3	-100.0	-19.7	-20.5	-49.3	-3.4	0.4	-0.7	-49.7	-0.4	-20.0
Northwest / Noroeste	-65.7	-100.0	-13.8	-3.5	-70.0	-75.2	-63.8	-50.0	-92.7	-91.6	-72.3
TOTAL	-25.1	-87.0	-21.3	-21.8	-28.2	-4.2	3.3	-85.3	-34.3	-6.1	-25.9

statistics, continue to use fuel oil in their processes, particularly Plan de San Luis in San Luis Potosí and Pánuco in Tamaulipas.

Despite the increase in sugarcane-growing area in this region, there was a reduction in BC emissions, mainly explained by the drop in productivity that

No obstante, entre las regiones cañeras y aún entre los ingenios dentro de éstas, existen diferencias en las tendencias técnico-productivas que se han convertido en contrastes, tanto desde el punto de vista productivo, como en lo ambiental. El Cuadro 1 sintetiza algunas de éstas.

resulted in lower production and thus decreased emission of air pollutants such as BC.

Development of the sector in this region has been relegated to the highlands due to competition from other activities such as ecotourism, cattle ranching and fodder crops. Additionally, this area is part of Mexico's soybean corridor, which increases pressure on land use (INIFAP, 2014).

The **Gulf Region** is home to more than 40 % of the sugar mills that operated in the country during the 2022/23 harvest. It is the Mexican region with the largest sugarcane area and the most sugar mills. It is located between central Veracruz, northern Oaxaca and eastern Puebla. Its productivity has suffered significant losses due to decreases in area, field yields and production quality. Even so, the region produces 37.1 % of the country's sugar.

Due to its volumes, it is the most polluting sugarcane-growing region despite a 27.5 % drop in its BC emissions during the period. In this area, sugarcane competes with crops such as papaya, chili, pineapple and chayote (Bada Carbajal and Rivas Tovar, 2010), which could lead sugarcane farmers to converting to one of these crops if confronted by adverse economic and production conditions.

The **Southeast Region** is made up of seven sugar mills that share agroecological and cultural characteristics, but geographically it is the most dispersed sugarcane-producing region in the country as it is located between four states (SADER & CONADESUCA, 2019b). It is the third largest region and one of those that expanded the most. However, its production did not grow due to a drop in its production parameters.

The sector's territorial expansion has been influenced by the Guatemalan sugar industry (subsidized by the United States), which has more than doubled in size in just 50 years; however, its future development will be limited by deep-rooted sectors, such as oil and tourism, and their accompanying urbanization, as well as by federal and state government priorities, added to which it is an important region in terms of protected areas (Cadena Roa et al., 2018).

Despite its growth, BC emissions decreased by 5.6 % due to reduced productivity, resulting in a

La **Región Noreste** es la segunda más extensa del país y produce una quinta parte del azúcar nacional. Durante un periodo dejó de operar uno de sus ingenios, el Aarón Sáenz Garza de Tamaulipas. Sus propietarios forman parte de los consorcios azucareros más grandes del país y la inversión extranjera ha comenzado a apropiarse de algunos de sus ingenios: en 2011 la guatemalteca Pantaleón adquirió Pánuco de Veracruz y en 2020 El Mante de Tamaulipas.

Sus ingenios se encuentran en una de las dos zonas cañeras que, según las estadísticas de CONADESUCA, continúan utilizando combustóleo en sus procesos, particularmente Plan de San Luis, de San Luis Potosí y Pánuco de Tamaulipas.

A pesar del incremento en la superficie cañera de esta región, se suscitó una reducción de emisiones de BC, explicada principalmente por la caída en la productividad que redundó en una menor producción, y con ella, la emisión de contaminantes del aire como el BC.

El desarrollo de esta región se ha relegado hacia la parte serrana por la competencia que existe con otras actividades como el ecoturismo, la ganadería y los cultivos forrajeros. Adicionalmente, esta zona forma parte del corredor sojero de México, lo que incrementa la presión por el uso del suelo (INIFAP, 2014).

La **Región Golfo** alberga a más del 40 % de los ingenios que operaron en el país durante la zafra 2022/23. Es la de mayor superficie cañera y con más ingenios en el país. Se sitúa entre el centro de Veracruz, el norte de Oaxaca y el oriente de Puebla. Su productividad ha sufrido pérdidas importantes por decrementos en su superficie, rendimientos en campo y calidad de su producción. Aun así, la región produce 37.1 % del azúcar nacional.

Por sus volúmenes, es la región cañera más contaminante, a pesar de una caída del 27.5 % de sus emisiones de BC durante el periodo. En esta zona, la caña compete con cultivos como papaya, chile, piña y chayote (Bada Carbajal y Rivas Tovar, 2010), lo que implica la posibilidad de su sustitución ante condiciones económico-productivas adversas.

La **Región Sureste** está integrada por siete ingenios que comparten características agroecológicas y culturales, pero geográficamente es la región cañera

decrease in the amount of sugarcane produced and processed at a rate similar to that of its emissions.

The **Central Region**, home to only three sugar mills, is located between the state of Morelos and western Puebla. It is the smallest in terms of harvested area, with only 4.2 % of the national total. Currently, the sugarcane-growing activity in this region is being pressured by the growing urbanization of the area, due to its privileged location, being closest to the country's main consumption center (SADER and CONADESUCA, 2019a).

In contrast, it is the most productive area, with field yields exceeding 100 tons per hectare, comparable to the most productive areas in the world. Despite this, its yields have been declining, causing a contraction in its sugarcane and sugar production. Fuel oil is no longer used in its mills, but sugarcane is burned in practically all of its area; however, its BC emissions decreased by 7.8 % due to reduced production.

With 10 sugar mills, the **Pacific Region** is located between the states of Jalisco, Michoacán and Colima, and occupies 13.5 % of Mexico's sugarcane area. As in most of the country's sugarcane regions, both its field and agro-industrial productivity decreased, and with it the production of sugar, the main product obtained from sugarcane in the country's sugar mills.

This region produces some of the most profitable crops in the country, such as agave, avocado and lemon, which compete with sugarcane by achieving better prices and more marketing options, making the sugarcane sector highly sensitive to adverse scenarios (Carrillo Enciso, 2018).

The region's mills have eliminated the use of fuel oil in their processes, which, together with the decrease in their production, reduced their BC emissions by 20.0 %, which reveals the relationship between production and BC emissions in this sector.

The **Northwest Region** includes the sugar mills and their supply areas in the states of Nayarit and Sinaloa. During recent decades it has been the weakest sugarcane region due to various factors, such as the gradual closure of its sugar mills. In the last decade alone, four of the six mills that operated during the 2012/13 harvest closed. As a result, coupled with a decrease in its production parameters, sugarcane production fell by 70 % during the period.

más dispersa del país al situarse entre cuatro estados (SADER y CONADESUCA, 2019b). Es la tercera región más extensa y una de las que más se expandió. No obstante, su producción no creció debido a la caída de sus parámetros productivos.

Su expansión territorial ha estado influenciada por la industria guatemalteca (subsidiada por Estados Unidos), que ha crecido a más del doble en tan solo 50 años; no obstante, su desarrollo futuro estará limitado por sectores muy arraigados, así como por las prioridades de los gobiernos federal y estatales, como el petróleo y el turismo, y su consecuente urbanización; además de ser una importante zona de áreas protegidas (Cadena Roa, et al., 2018).

A pesar de su crecimiento, las emisiones de BC decrecieron en 5.6 %, debido a la reducción de su productividad, lo que dio como resultado una disminución en la caña producida y procesada a una tasa similar a la de sus emisiones.

La **Región Centro**, con solo tres ingenios se sitúa entre el estado de Morelos y el occidente de Puebla. Es la más pequeña en cuanto a superficie cosechada, con solo el 4.2 % del total nacional. Actualmente la actividad cañero-azucarera de esta región es presionada por la creciente urbanización de la zona, derivada su ubicación privilegiada, al ser la más cercana al principal centro de consumo del país (SADER y CONADESUCA, 2019a).

En contraste, es la zona más productiva, con rendimientos en campo que superan las 100 toneladas por hectárea, comparable con las zonas más productivas del mundo. A pesar de ello, su rendimiento ha ido a la baja, lo que provocó una contracción de su producción de caña y azúcar. Se dejó de usar combustóleo en sus ingenios, pero la quema de caña se realiza prácticamente en toda su superficie; no obstante, sus emisiones de BC descendieron en 7.8 % por la reducción de su producción.

Con 10 ingenios, la **Región Pacífico** se encuentra situada entre los estados de Jalisco, Michoacán y Colima, y ocupa 13.5 % de la superficie cañera de México. Al igual que en la mayoría de las regiones cañeras del país, tanto su productividad en campo como agroindustrial decreció y con ello la producción de azúcar, el principal producto obtenido de la caña de azúcar en los ingenios nacionales.

This area, and particularly Sinaloa, has a technology-intensive agriculture with very profitable crops such as vegetables for export, so, when encountering adverse conditions, sugarcane producers and entrepreneurs tend to convert to another crop (Santiago Zárate et al., 2021).

Due to these indicators, the suppression of fuel oil and a reduction in the proportion of sugarcane burned during harvesting, its BC emissions were reduced by 72.3 %.

Figures 7 to 12 represent BC emissions in each of the country's sugarcane regions during the 2022/23 harvest.

Discussion

The sugarcane sector has existed in our country for more than five centuries, marked by important periods of development. However, the sector began stagnating several decades ago and it has been battered by recurring crises ever since then due to various factors, causing a sustained decline (González Muñoz & Meneses Aguirre, 2015; OECD and FAO, 2021).

Despite its economic and social importance, the sector's productive and industrial practices are highly polluting and affect human health (Pérez Cruz, 2015). The use of agricultural machinery, the burning of sugarcane fields during the harvest, the traffic of heavy vehicles used during the harvest, as well as the use of petroleum derivatives and sugarcane bagasse as the main fuels for industrial processes generate a large amount and diversity of air pollutants.

All these factors allow us to affirm that the sector's continuity is at risk, even without considering climate change scenarios and the growing trend towards a reduction in per capita sugar consumption and the emergence of new, highly competitive sugar-producing countries.

However, these trends are neither uniform nor unidirectional in Mexico's sugarcane-producing area; each of the regions that comprise it has its own particular characteristics and problems. Therefore, while some regions are experiencing full growth, others show signs of decline and risk disappearing.

The Gulf Region has the largest area and number of sugar mills, as well as being the most polluting. It

En esta región se producen algunos de los cultivos más redituables del país: agave, aguacate y limón, los cuales compiten con la caña de azúcar al alcanzar mejores precios y más opciones de comercialización. Es por ello por lo que en esta zona el sector cañero azucarero tiene alta sensibilidad a escenarios adversos (Carrillo Enciso, 2018).

Sus ingenios han eliminado el uso combustóleo en sus procesos, lo que aunado al decremento de su producción hizo descender sus emisiones de BC en 20.0 %, lo que revela la relación que guardan la producción y las emisiones de BC en este sector.

La **Región Noroeste** comprende los ingenios y sus zonas de abasto en los estados de Nayarit y Sinaloa. Durante las últimas décadas ha sido la región cañera más endeble por diversos factores como el cierre paulatino de sus ingenios. Tan solo en la última década cerraron cuatro de los seis ingenios que operaron durante la zafra 2012/13. Con ello, aunado al descenso de sus parámetros productivos, la producción de caña se redujo en 70 % durante el periodo.

Esta zona, y particularmente Sinaloa, tienen una agricultura altamente tecnificada con cultivos muy rentables como las hortalizas de exportación, por lo que, al encontrar condiciones adversas, los productores y empresarios de caña de azúcar tienden a la sustitución productiva (Santiago Zárate et al., 2021).

Debido a estos indicadores, la supresión de combustóleo y la reducción en la proporción de caña quemada durante las cosechas, sus emisiones de BC se redujeron en 72.3 %.

Las Figuras 7 a 12 representan las emisiones de BC en cada una de las regiones cañeras del país, durante la zafra 2022/23.

Discusión

El sector cañero azucarero cuenta con una historia de más de cinco siglos en nuestro país, en los que ha tenido importantes periodos de desarrollo. No obstante, desde hace varias décadas el sector se estancó y comenzó a sufrir crisis recurrentes por diversos factores provocando un declive sostenido (González Muñoz y Meneses Aguirre, 2015; OECD y FAO, 2021).

A pesar de la importancia económica y social, las prácticas productivas e industriales del sector son altamente contaminantes y afectan la salud humana

Figure 7. Northeast sugarcane region and its black carbon (BC) emissions.

Figura 7. Región cañera Noreste y sus emisiones de carbono negro.

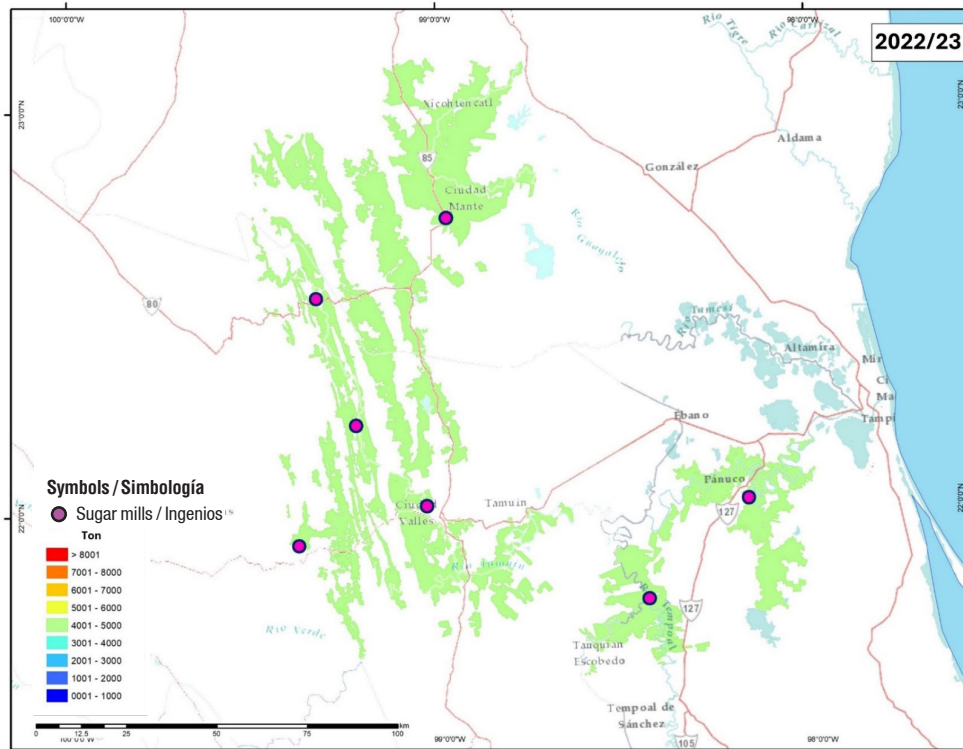


Figure 8. Gulf sugarcane region and its black carbon (BC) emissions.

Figura 8. Región cañera Golfo y sus emisiones de carbono negro.

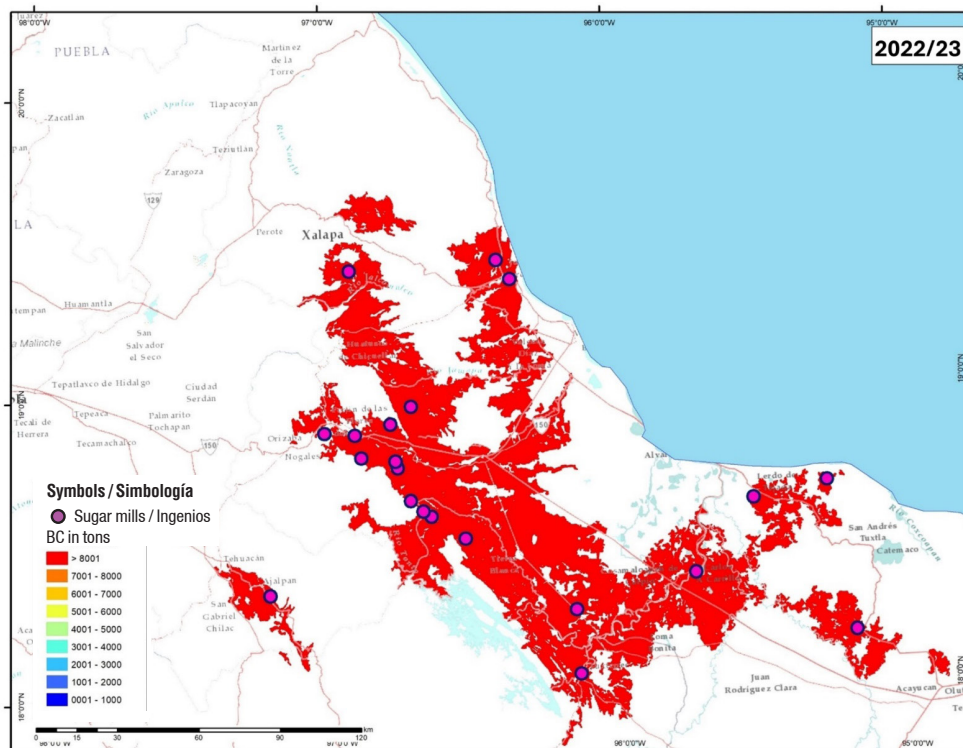


Figure 9. Southeast sugarcane region and its black carbon (BC) emissions.

Figura 9. Región cañera Sureste y sus emisiones de carbono negro.

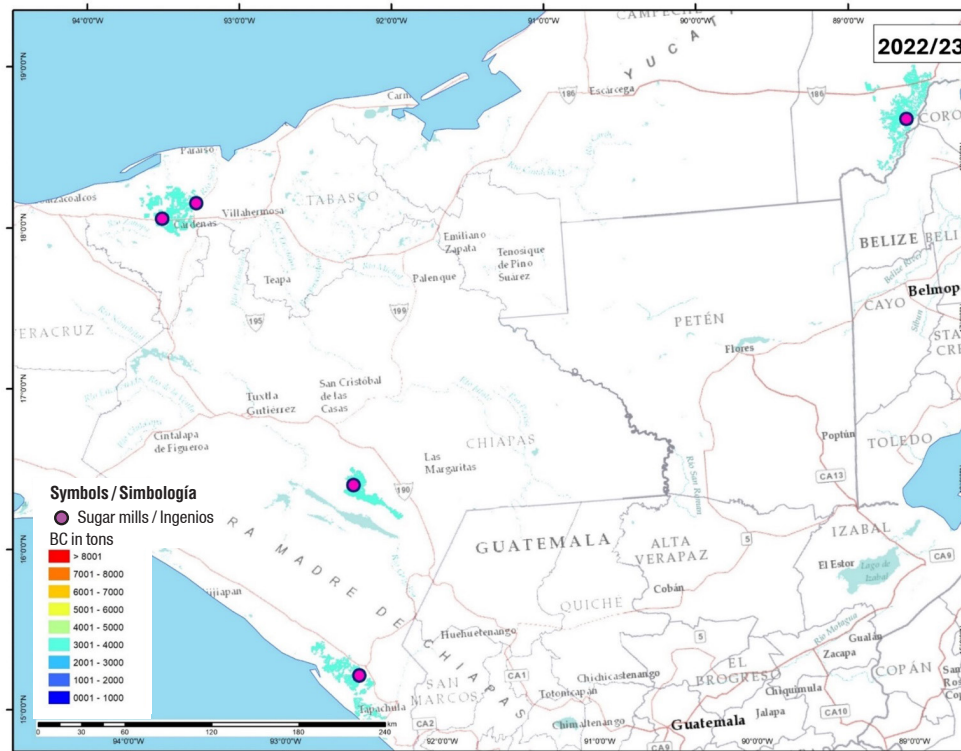


Figure 10. Central sugarcane region and its black carbon (BC) emissions.

Figura 10. Región cañera Centro y sus emisiones de carbono negro.

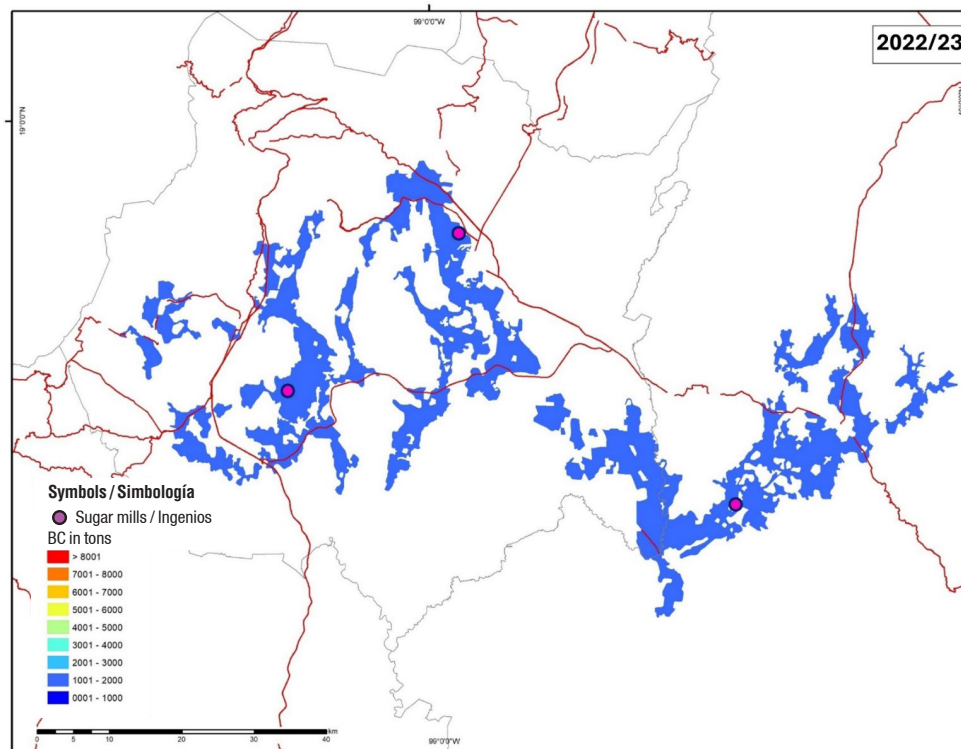


Figure 11. Pacific sugarcane region and its black carbon (BC) emissions.
Figura 11. Región cañera Pacífico y sus emisiones de carbono negro (BC).

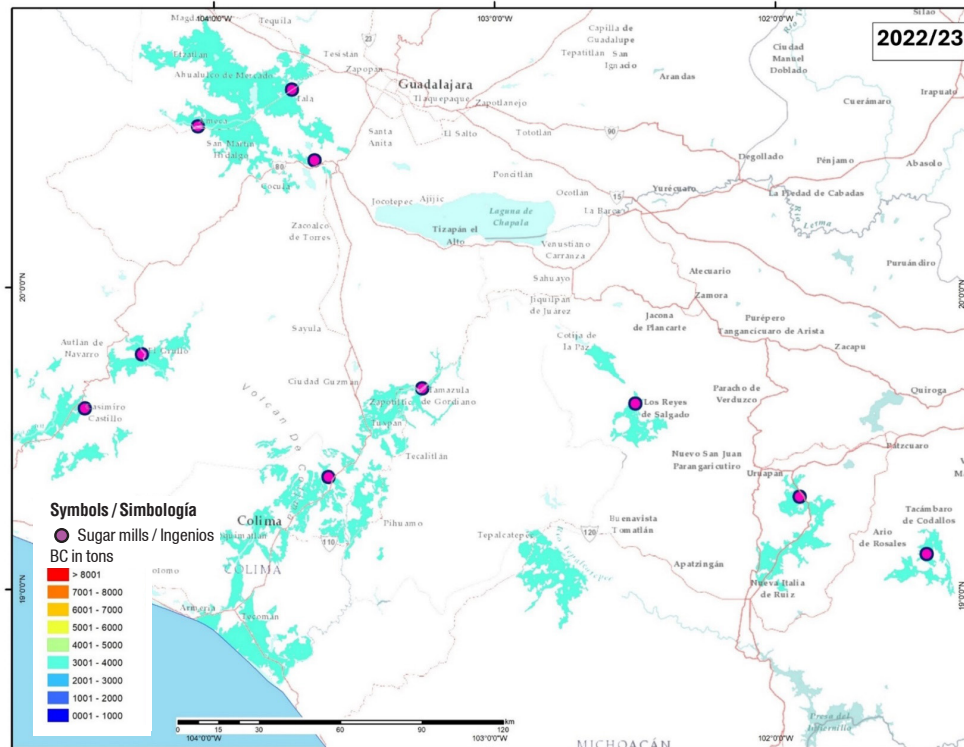
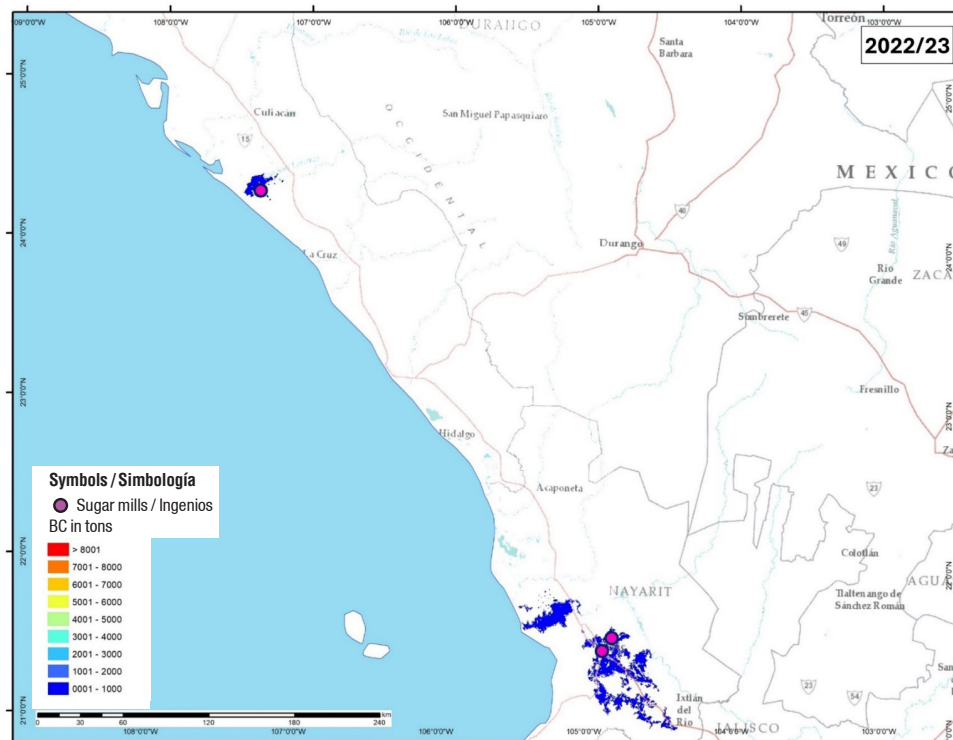


Figure 12. Northwest sugarcane region and its black carbon (BC) emissions.
Figura 12. Región cañera Noroeste y sus emisiones de carbono negro (BC).



supplies Mexico's largest consumption center: the Valley of Mexico and the conurbations of Toluca and Puebla-Tlaxcala. It is concentrated in a relatively compact area that is growing, but at a slower rate than other areas.

The Southeast Region, which traditionally had not been relevant for the sector, is undergoing full expansion with the highest growth rate in the country, due to its geographic proximity to Guatemala, which in turn is subsidized by the United States. Its future development will be limited, however, by other traditional, profitable economic activities of interest to the government.

The Central Region is at a crossroads: it has the highest productivity in the country, but its development and permanence is at risk due to the pressure of urbanization, resulting from its geographic location.

The Pacific Region has good productivity, but without major improvements, as it has had to resort to incorporating land to expand its production, and coexists with such profitable crops as avocado, agave and citrus.

The clearest manifestation of the sector's crisis can be found in the Northwest Region: closure of mills and reduction in area, productivity and production, particularly in the state of Sinaloa. This is the most technologically advanced agricultural area in the country, enabling it to produce large quantities of vegetables for export. This has meant that, given the instability of the sector, producers and industrialists have opted for more profitable and stable crops.

Conclusions or findings

The heterogeneity of the economic, productive, social and cultural conditions in which the national sugarcane sector operates has made it an increasingly less attractive alternative for producers and industrialists in several sugarcane regions of the country.

Those who have decided to continue producing have resorted to expanding their area rather than modernizing their production systems, which, in addition to being obsolete, have a high environmental and human health impact. An example of this is the emission of pollutants such as

(Pérez Cruz, 2015). El uso de maquinaria agrícola, la quema de los cañaverales durante la cosecha, el tráfico de vehículos pesados utilizados durante la zafra, así como el uso de derivados del petróleo y bagazo de caña como principales combustibles para los procesos industriales, generan una gran cantidad y diversidad de contaminantes del aire.

Todos estos factores permiten afirmar que la continuidad del sector está en riesgo, aún sin considerar los escenarios de cambio climático y la creciente tendencia a la reducción del consumo per cápita de azúcar y el surgimiento de nuevos países productores de azúcar altamente competitivos.

Ahora bien, estas tendencias no son uniformes ni unidireccionales en la zona cañera nacional; cada una de las regiones que la integran cuentan con características particulares y una problemática propia; por lo que, mientras algunas regiones se encuentran en pleno crecimiento, otras muestran síntomas de declive y riesgo de desaparecer.

La Región Golfo cuenta con la mayor superficie y número de ingenios, así como la más contaminante. Abastece al centro de consumo más grande de México: El Valle de México y las conurbaciones de Toluca y Puebla-Tlaxcala. Se concentra en un área relativamente compacta que crece, pero a un ritmo menor que otras zonas.

La Región Sureste, que tradicionalmente no había sido relevante para el sector, se encuentra en plena expansión con el mayor ritmo de crecimiento del país, propiciado por su cercanía geográfica con Guatemala, quien a su vez es subsidiada por Estados Unidos. Su desarrollo futuro estará limitado, sin embargo, por otras actividades económicas tradicionales, rentables y de interés para el gobierno.

La Región Centro se encuentra en una encrucijada: cuenta con la mayor productividad del país, pero su desarrollo y permanencia se encuentra en riesgo por la presión de la urbanización, derivada de su ubicación geográfica.

La Región Pacífico cuenta con buena productividad, pero sin grandes mejoras, pues ha tenido que recurrir a la incorporación de tierras para ampliar su producción, y coexiste con cultivos tan rentables como el aguacate, el agave y los cítricos.

BC, which has been reduced from 2013 to date, but not at the rate necessary to proportionally achieve the targets set by Mexico.

The structure and organization of the sugarcane sector, the neglect and lack of regulation by the government and the despotism of large sugar consortia have contributed to the stagnation and even the decline of the sector in terms of productivity and diversification.

Regarding the impact generated, and taking BC emissions as an indicator of this, it must be considered that the reduction of emissions was mainly due to a decline in production in several of the country's sugarcane regions and not to the widespread implementation of improvements that allow for cleaner and more sustainable productive and industrial systems.

From all of the above, it can be concluded that, after the last decade, Mexico has a sugarcane sector where the emission of air pollutants such as BC is directly related to the production and industrialization of sugarcane. Currently, the sector is larger in area, but less productive, depends mostly on the rainy season and sugar prices, and continues to be unsustainable.

Therefore, if we want to give it greater odds of permanence, we must promote, among other initiatives, the creation, operation and monitoring of comprehensive programs to reactivate the sector, including breeding and modernization of infrastructure in an agriculture 4.0 environment and with legislation in line with the current situation.

End of English version

References / Referencias

- Aguilar Rivera, N., Galindo Mendoza, G., Fortanelli Martínez, J., & Contreras Servín, C. (2015). Factores de competitividad de la agroindustria de la caña de azúcar en México. *Región y sociedad*, 23(52). <https://doi.org/10.22198/rys.2011.52.a188>
- Aguilar Rivera, N., Siller, M. A., & Olvera-Vargas, L. A. (2015). Gestión del agua como factor limitante de productividad cañera en México. *Norte Grande Geography Journal*, 60, 135-152. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022015000100008>
- Bada Carbajal, L. M., & Rivas Tovar, L. A. (2010). Los clusters agroindustriales en el estado de Veracruz. *Investigación*

La manifestación más clara de la crisis del sector se encuentra en la Región Noroeste: cierre de ingenios y reducción de superficie, productividad y producción, particularmente en el estado de Sinaloa. Esta zona es la de mayor tecnificación agrícola del país, por lo que es capaz de producir importantes cantidades de hortalizas de exportación. Esto ha propiciado que, ante la inestabilidad del sector, los productores e industriales hayan optado por cultivos más rentables y estables.

Conclusiones o hallazgos

La heterogeneidad de las condiciones económicas, productivas, sociales y culturales en las que se desarrolla el sector cañero azucarero nacional, han propiciado que represente una alternativa cada vez menos atractiva para los productores e industriales de varias regiones cañeras del país.

Quienes han decidido continuar produciendo, han recurrido a la expansión territorial y no a la modernización de sus sistemas de producción, que además de obsoletos resultan de alto impacto ambiental y para la salud humana. Ejemplo de ello, es la emisión de contaminantes como el BC, el cual se ha reducido de 2013 a la fecha, pero no al ritmo necesario para alcanzar de forma proporcional las metas propuestas por México.

La estructura y organización del sector cañero azucarero, el abandono y falta de regulación por parte del gobierno y, el neocaciquismo ejercido por grandes consorcios azucareros, han contribuido al estancamiento e incluso el retroceso del sector en términos de productividad y diversificación.

En lo concerniente al impacto generado, y tomando las emisiones de BC como un indicador de éste, hay que considerar que, la reducción de las emisiones se debió principalmente a un declive en la producción en varias de las regiones cañeras del país y no a la implementación generalizada de mejoras que permitan tener sistemas productivos e industriales más limpios y sostenibles.

De todo lo anterior, se puede concluir que, tras la última década, México tiene un sector cañero azucarero en donde la emisión de contaminantes del aire como el BC está directamente relacionada con la producción e industrialización de la caña de azúcar. Actualmente, el sector es más extenso en superficie,

- Administrativa*, 39(105), 73-100. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=456045211005>
- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Bernsten, T., DeAngelo, B. J., Flanner, M. G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P. K., Sarofim, M. C., Schultz, M. G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S.,..., Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(11), 5380-5552. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>
- Burroughs Peña, M. S., & Rollins, A. (2017). Environmental Exposures and Cardiovascular Disease. *Cardiology Clinics*, 35(1), 71-86. <https://doi.org/10.1016/j.ccl.2016.09.001>
- Cadena Roa, J., Aguilar Robledo, M., & Vázquez Salguero, D. E. (2018). *Las ciencias sociales y la agenda nacional. Reflexiones y propuestas desde las Ciencias Sociales*. México: COMECESO. <https://www.comeceso.com/ciencias-sociales-agenda-nacional/cs/issue/view/5>
- Carrillo Enciso, H. G. (2018). Productividad y rentabilidad de la caña de azúcar. *El Economista*. <https://www.eleconomista.com.mx/mercados/Productividad-y-rentabilidad-de-la-cana-de-azucar-20180320-0094.html>
- CEFP. Centro de Estudios de las Finanzas Públicas. (2001). La agroindustria azucarera en México. En *Centro de Estudios de las Finanzas Públicas* (CEFP/039/2001). <https://www.cefp.gob.mx/intr/edocumentos/pdf/cefp/cefp0392001.pdf>
- Chaudhuri, I., Fruijtier-Pöloth, C., Ngiewih, Y., & Levy, L. (2017). Evaluating the evidence on genotoxicity and reproductive toxicity of carbon black: a critical review. *Critical Reviews in Toxicology*, 48(2), 143-169. <https://doi.org/10.1080/10408444.2017.139174>
- CONADESUCA. Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. (2023). 10° Informe Estadístico del Sector Agroindustrial de la Caña de Azúcar en México. En *Gobierno de México*. https://www.siiiba.conadesuca.gob.mx/siiiba/docext/10mo_Informe_Estadistico.pdf
- CONADESUCA. Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. (2023). *Reportes. Sistema Sinfocaña*. <https://www.gob.mx/conadesuca/acciones-y-programas/sistema-infocana>
- EPA. United States Environmental Protection Agency. (2022). *AP-42: Compilation of Air Emissions Factors*. US EPA. <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>
- Gobierno de México. (2015). *Los compromisos de México ante el Cambio Climático*. <https://www.gob.mx/gobmx/articulos/los-compromisos-de-mexico-ante-el-cambio-climatico>
- pero menos productivo, depende en su mayoría del temporal y de los precios del azúcar y continúa siendo no sostenible.
- Es por ello por lo que, si se le quiere dar una mayor certeza de permanencia, se debe impulsar la creación, operación y seguimiento de programas integrales de reactivación del sector, que incluyan el mejoramiento genético y modernización de infraestructura en un entorno de agricultura 4.0 y con una legislación acorde a la situación actual, entre otros aspectos a considerar.
- Fin de la versión en español*
- =====
- González Muñoz, O., & Meneses Aguirre, B. (2015). El abandono de la política económica en la actividad agrícola: el caso de la pobreza rural en Veracruz, México como posible consecuencia (2000-2012). *Ciencia Administrativa*, 159-169. <https://cienciadministrativa.uv.mx/index.php/cadmiva/issue/view/195>
- INECC. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2020). *Lineamientos para el desarrollo de inventarios de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero, para los gobiernos estatales y municipales*. INECC. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/613436/90_2020_LineamientosElaboracion_IEGyCEI.pdf
- INIFAP. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (2014). *Tecnología de producción en soya [Glycine max (L.) Merrill] para el norte de Tamaulipas* (Primera). Print House.
- Le Blond, J. S., Woskie, S., Horwell, C. J., & Williamson, B. J. (2017). Particulate matter produced during commercial sugarcane harvesting and processing: A respiratory health hazard? *Atmospheric Environment*, 149, 34-46. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.11.012>
- Manzini Poli, F. L., Islas-Samperio, J. M., García Bustamante, C. A., Sacramento Rivero, J. C., Grande-Acosta, G. K., Gallardo-Álvarez, R. M., Musule Lagunes, R., Navarro Pineda, F., & Álvarez Escobedo, C. (2022). Sustainability Assessment of Solid Biofuels from Agro-Industrial Residues Case of Sugarcane Bagasse in a Mexican Sugar Mill. *Sustainability*, 14(3), 1711. <https://doi.org/10.3390/su14031711>
- Martínez, M. D. P. (2023). *Producción de azúcar en México cayó 15.53 % en último ciclo*. *El Economista*. Recuperado 22 de marzo de 2024, de <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/>

- Cosecha-mexicana-de-azucar-cae-15-y-los-precios-se-disparan-a-1535-pesos-por-bulto-20231011-0061.html
- Mugica Álvarez, V. (2016). *Determinación de Factores de Emisión de Bióxido de Carbono (CO₂), Partículas En Suspensión de 2.5 y 10 Micras (PM_{2.5} y PM₁₀) y Contaminantes de Vida Corta, Metano (CH₄) y Carbono Negro Por Prácticas de Quema Agrícola*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/290687/Factores_de_Emision_de_Quema_Agricola_CGMCC_2016.pdf
- OECD & FAO. Organization for Economic Cooperation and Development y Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2021). Azúcar. En *OCDEFAO Perspectivas Agrícolas 2021-2030* (pp. 167-180). OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/3463d2a1-es>
- Paunescu, A. C., Casas, M., Ferrero, A., Pañella, P., Bougas, N., Beydon, N., Just, J., Lezmi, G., Sunyer, J., Ballester, F., & Momas, I. (2019). Associations of black carbon with lung function and airway inflammation in schoolchildren. *Environment International*, 131, 104984. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.104984>
- Pérez Cruz, J. R. (2015). *La dinámica de la agroindustria azucarera nacional: de su estructura productiva a su huella ecológica; el papel de sus actores sociales y las políticas públicas. El caso de los ingenios del estado de Puebla* (TFG). Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.
- Pérez Medina, P. (2022). La agroindustria cañera en México y los factores que han determinado su historia reciente (1961-2021). *Revista Inclusiones*, 9(Número especial), 41-70. <https://revistainclusiones.org/index.php/inclu/article/view/3224>
- Quintana-Quintalán, O. M. (2021). *Análisis y elaboración del Inventario de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (GYCEI) del sector azucarero de San Luis Potosí*. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí
- Santiago Zárate, I. M., Martínez Damián, M. N., Cuevas Alvarado, C. M., Valdivia Alcalá, R., García Hernández, M. I., & Hernández Toscano, J. (2021). Productividad y cambio tecnológico en la agroindustria de la caña de azúcar en México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(6), 1005-1017. <https://doi.org/10.29312/remexca.v12i6.2692>
- SAGARPA. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (2009). *Digitalización del Campo Cañero en México para Alcanzar la Agricultura de Precisión de la Caña de Azúcar*. <https://www.siiiba.conadesuca.gob.mx/siiba/Consulta/>
- SADER. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021). *Caña de azúcar un cultivo de importancia para México*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/cana-de-azucar-un-cultivo-de-importancia-para-mexico?idiom=es>
- SADER & CONADESUCA. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural y Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. (2019a). Diagnóstico de la Agroindustria de la Caña de Azúcar Región Centro. En *Diagnósticos Regionales de la Agroindustria de la Caña de Azúcar en México*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/487172/Dx_Centro_VF.pdf
- SADER & CONADESUCA. Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural y Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar. (2019b). Diagnóstico de la Agroindustria de la Caña de Azúcar Región Sureste. En *Diagnósticos Regionales de la Agroindustria de la Caña de Azúcar en México*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/487177/Dx_Sureste_VF.pdf
- SEMARNAT & INECC. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2018). Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 1990-2015. En *Biblioteca digital de Cambio Climático*. <http://189.240.101.244:8080/xmlui/handle/publicaciones/226>
- SIAP. Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2023). *Producción Agrícola*. Cierre de la producción agrícola (1980-2022). <https://www.gob.mx/siap/acciones-y-programas/produccion-agricola-33119>
- Solleiro, J. L., Castañón, R., Salinas, C. M., & Hernández, S. B. (2020). *Agenda de innovación intersectorial para el desarrollo de la agroindustria de la caña de azúcar para Oaxaca, San Luis Potosí y Veracruz*. [https://www.redinnovagro.in/pdfs/Agenda%20de%20innovaci%C3%B3n%20intersectorial%20para%20el%20desarrollo%20de%20la%20agroindustria%20de%20la%20ca%C3%B1a%20de%20az%C3%BAcar%203_compressed%20\(1\).pdf](https://www.redinnovagro.in/pdfs/Agenda%20de%20innovaci%C3%B3n%20intersectorial%20para%20el%20desarrollo%20de%20la%20agroindustria%20de%20la%20ca%C3%B1a%20de%20az%C3%BAcar%203_compressed%20(1).pdf)
- Solomon, S., Qin, D., & Manning, M. (2018). *Informe aceptado por el Grupo de Trabajo I del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio climático pero no aprobado en detalles*. IPCC. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/ar4-wg1-ts-sp.pdf>
- Varillas, A., & Castro, A. (2022). *Caña de azúcar: el monocultivo que transformó al sur de Quintana Roo*. MONGABAY Noticias ambientales. <https://es.mongabay.com/2022/08/cana-de-azucar-deforestacion-en-mexico/>