

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA
PROGRAMA MULTIDISCIPLINARIO DE POSGRADO EN CIENCIAS
AMBIENTALES

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES

SITUACIÓN E IMPACTOS DE LA ACTIVIDAD CAÑERO-AZUCARERA EN MÉXICO: EL CASO DEL CARBONO NEGRO EN SAN LUIS POTOSÍ

PRESENTA:

M. C. PEDRO PÉREZ MEDINA

DIRECTOR DE TESIS:

DRA. MARÍA GUADALUPE GALINDO MENDOZA

ASESORES:

DR. GREGORIO ÁLVAREZ FUENTES

DR. LEONARDO DAVID TENORIO MARTÍNEZ

2023

**El Laboratorio Nacional de Geoprocesamiento de Información Fitosanitaria
(LaNGIF) de la Coordinación para la Innovación y Aplicación de la Ciencia y la
Tecnología (CIACYT)**

CON FINANCIAMIENTO DE:

**Fondo Sectorial de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación en Actividades
Espaciales CONACYT-AEM 2018 propuesta B-S-64363**

A TRAVÉS DEL PROYECTO DENOMINADO:

**Modelo de innovación para la identificación y monitoreo de contaminantes
atmosféricos a través de tecnología espacial**

Proyecto CONACYT de Problemas Nacionales 2016 (01-3849)

A TRAVÉS DEL PROYECTO DENOMINADO:

**Evaluación de la fracción orgánica presente en las partículas atmosféricas en el
estado de San Luis Potosí y su impacto en el cambio climático y la salud pública**

AGRADEZCO A CONACYT EL OTORGAMIENTO DE LA BECA-TESIS

Becario No. 165553

**EL DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES RECIBE APOYO ATRAVÉS
DEL PROGRAMA NACIONAL DE POSGRADOS DE CALIDAD (PNPC)**



SITUACIÓN E IMPACTOS DE LA ACTIVIDAD CAÑERO-AZUCARERA EN MÉXICO: EL CASO DEL CARBONO NEGRO EN SAN LUIS POTOSÍ by PEDRO PÉREZ MEDINA is licensed under a [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

DEDICATORIA

A mi amados padres, por dedicar su vida entera a intentar que soy sea feliz.

A mis hermanos, por todos los momentos juntos en esa infancia lejana pero de muy felices recuerdos.

A mi pedacito de vida, mi inspiración más grande, mis ganas de ser una mejor persona cada día, mi hermosa e inteligente sobrina, Dulce Guadalupe Pérez Martínez.

A mi génesis biológico y cultural, las familias Pérez y Medina.

A mi familia elegida, quien me acompaña en mis mejores y en mis peores momentos, a mis queridos amigos.

AGRADECIMIENTOS ACADÉMICOS

A la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, a través del Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales, por permitirme formar parte de su comunidad y proporcionarme los recursos para formarme y crecer como profesionista y como ser humano.

A los doctores Guadalupe Galindo Mendoza, Gregorio Álvarez Fuentes y Leonardo David Tenorio Martínez, por su dirección, sus enseñanzas, y su invaluable apoyo, en todo momento.

Al Laboratorio Nacional de Geoprocesamiento de Información Fitosanitaria (LaNGIF) por el espacio y soporte provistos. Un agradecimiento muy especial a Ing. Ángel de Jesús Quiroz Gaspar, Lic. Geovanni Saldierna Salas y Margarita Estrada Saucedo, por toda su ayuda y sobre todo, por su amistad. Asimismo, agradezco al Dr. Carlos Contreras Servín por su apoyo y enseñanzas.

A las instalaciones y personal académico y administrativo del Tecnológico Nacional de México - Campus Ciudad Valles (TecNM - Ciudad Valles) por todas las facilidades prestadas para la realización de la fase de campo de esta investigación. Especialmente a: Ing. Héctor Aguilar Ponce, Dra. Cynthia Wong Argüelles, M.S.C. Jaime Jesús Delgado Meraz e Ing. Omar Murrieta Pozos.

Al Dr. Valter Armando Barrera López, por sus enseñanzas y apoyo y al Ing. Salvador San Román Barrón, mi compañero de fórmula en la fase de campo.

AGRADECIMIENTOS PERSONALES

A Dios y a la vida por darme las características necesarias y ubicarme en los lugares y momentos indicados para poder cumplir mis metas y realizar mis sueños, transformándome en una mejor persona.

Al indeleble, ininterrumpido, incondicional e infinito amor de mis padres.

A toda mi familia por su apoyo en todo momento; particularmente a la familia Lugo Medina.

A todos los que me han concedido un espacio en su vida, por considerarme merecedor de su afecto, de su tiempo y de su espacio: Lolita Sánchez Chávez, José Miguel Rodríguez Luna, familia Padilla Vega, Paty Stoupignan Guevara, Rudy Leija Parra, familia Martínez Banda, Citlali Fuentes Morales, Yadira Martínez Lara, May Ramírez, Esau Olivas Gallegos, Zaz Morales, Lucy Nonato y familia Telles Florencio, entre otros muchos; a todos los que estuvieron y todos los que estarán.

A todas aquellas personas han formado parte de mi historia personal; algunos se han ido, otros se han quedado, pero todos y cada uno han contribuido de alguna manera a que sea esta persona que soy hoy... muchas gracias a todos y por todo.

Contenido

RESUMEN.....	1
ABSTRACT	5
 I. LA AGROINDUSTRIA CAÑERA EN MÉXICO Y LOS FACTORES QUE HAN DETERMINADO SU HISTORIA RECIENTE (1961-2021)	9
RESUMEN.....	9
ABSTRACT	10
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. CONTEXTO HISTÓRICO	12
2.1. La caña de azúcar en México	14
3. ENTORNO INTERNACIONAL	16
3.1. Oferta	16
3.1.1. Producción.....	16
3.1.2. Rendimientos.....	18
3.1.3. Superficie.....	18
3.2. Demanda	19
3.3. Precios	21
3.4. Comercio	22
4. FACTORES INTERNOS	24
4.1. Producto	24
4.2. Oferta	24
4.3. Demanda	25
4.4. Cambio en los patrones de consumo	27
4.5. Competencia por el uso de los recursos con otros cultivos	29
4.6. Envejecimiento y obsolescencia en el sistema productivo e industrial	30
4.7. Impacto ambiental	31

4.8. Precios internos del azúcar	33
4.9. Diversificación poco desarrollada.....	34
5. CONCLUSIONES	35
6. BIBLIOGRAFÍA.....	37
 II. SITUACIÓN Y CONTRASTES REGIONALES DEL SECTOR CAÑERO AZUCARERO MEXICANO Y SU IMPACTO AMBIENTAL: EL CASO DEL CARBONO NEGRO	 42
RESUMEN.....	42
ABSTRACT	42
1. INTRODUCCIÓN.....	43
2. ENFOQUE METODOLÓGICO.....	44
2.1. Área de Estudio.....	44
2.2. Análisis por región.....	45
2.3. Estimación emisiones de BC del sector cañero en México	46
2.4. Representación espacial de las emisiones de BC	47
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	48
3.1. Resultados.....	48
3.1.1. Región Noreste.....	50
3.1.2. Región Golfo.....	53
3.1.3. Región Sureste.	55
3.1.4. Región Centro.....	57
3.1.5. Región Pacífico.....	59
3.1.6. Región Noroeste	61
3.2. Discusión.....	63
4. CONCLUSIONES O HALLAZGOS	64
5. REFERENCIAS Y CITAS.....	65
 III. MAPA DE QUEMA DE CAÑA DE AZÚCAR DURANTE LA ZAFRA 2021-2022 EN SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO	 69
RESUMEN.....	69

ABSTRACT	70
1. INTRODUCCIÓN	70
2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	72
3. MÉTODOS.....	75
4. RESULTADOS	78
5. CONCLUSIONES	82
6. SOFTWARE	83
7. REFERENCIAS	83

IV. ASSESSMENT OF BLACK CARBON IN CIUDAD VALLES, SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO, DURING SUGARCANE HARVEST 2020-2021

87

ABSTRACT	87
1. INTRODUCTION	87
2. MATERIALS Y METHODS.....	92
3. RESULTS AND DISCUSSION.....	95
4. CONCLUSIONS	101
5. REFERENCES	102

V. EVALUACIÓN DEL CARBONO NEGRO EN LA ZONA CAÑERA DE SAN LUIS POTOSÍ MEDIANTE EL USO DE TECNOLOGÍA SATELITAL Y SU USO PARA LA PROPUESTA DE UN ÍNDICE DE CALIDAD AMBIENTAL

109

RESUMEN.....	109
ABSTRACT	109
1. INTRODUCCIÓN.....	110
2. MATERIALES Y MÉTODOS	111
2.1. Área de estudio	111
2.2. Metodología	112
3. RESULTADOS	119
4. DISCUSIÓN.....	128
5. CONCLUSIONES	128
6. REFERENCIAS	129

VI. ECONOMIC ASSESSMENT OF THE IMPACT OF THE SUGARCANE INDUSTRY: AN EMPIRICAL APPROACH WITH TWO FOCUSES FOR SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

135

ABSTRACT	135
1. INTRODUCTION	135
2. MATERIALS AND METHODS	138
2.1. Study area	138
2.2. Model of costs	140
2.2.1. Model of Costs Associated with Human Health Due to Exposure to Air Pollution	140
2.2.2. Assessing the impact of sugarcane on ecosystem services	142
3. RESULTS	145
3.1. Economic valuation of air pollution from population exposure: the case of black carbon in Ciudad Valles, San Luis Potosí	145
3.2. Valuation of the costs of ecosystem services caused by the sugarcane sector	150
4. DISCUSSION	152
5. CONCLUSIONS	154
6. APPENDICES.....	156
Appendix A1. Morbidity Costs	156
Appendix A2. Mortality Costs	158
6. REFERENCES	158

ANEXOS

165

1. PROCESO DE PRODUCCIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR.....	165
2. ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIONES DE CARBONO NEGRO EN LA REGIÓN CAÑERA NORESTE DE MÉXICO	181

RESUMEN

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es una planta herbácea de la familia de las gramíneas o poáceas, el grupo vegetal de mayor importancia en términos alimenticios para los seres humanos. A ella pertenecen especies como el trigo (*Triticum spp.*), el maíz (*Zea mays*), el arroz (*Oryza sativa*), el sorgo (*Sorghum vulgare*), la cebada (*Hordeum vulgare*) y el centeno (*Secale cereale*), entre otros.

La mayor parte de la producción de la caña de azúcar se consume en alguna de sus formas industrializadas, por lo que la producción tiene un nexo casi insoluble con su agroindustria.

Su domesticación y uso se remontan a más de 3,000 años de antigüedad, aunque su demanda masiva como endulzante de bebidas y alimentos comenzó en Europa en el siglo VIII d.C. En los siglos subsecuentes y con el descubrimiento de América, la creciente demanda fue satisfecha con el cultivo en grandes extensiones del nuevo continente.

El valor que alcanzó el azúcar de caña y la falta de regulación en su comercialización propiciaron, a la par de fenómenos como sequías e inundaciones y, disturbios políticos y crisis económicas, abruptos incrementos y caídas en los precios del azúcar.

En las últimas décadas del siglo XX, algunos de los principales consumidores del azúcar eran las industrias refresquera y de confitería, los que hartos de la inestabilidad de los precios, optaron por el uso de productos sustitutos en sus fórmulas, como el jarabe de alta fructuosa de maíz.

En lo referente al consumo directo, se ha gestado un cambio en los patrones de consumo por productos bajos en calorías, por lo que muchos consumidores han comenzado a optar por sustitutos artificiales del azúcar y más recientemente por derivados naturales como el azúcar de Stevia y el fruto del monje.

Todo ello ha propiciado la caída del consumo per cápita de azúcar de caña, y la demanda agregada se ha mantenido sólo por la explosión demográfica de algunos países de bajos ingresos, principalmente de Asia.

En México, esta problemática se ha visto agravada por la falta de políticas que fomenten el desarrollo sustentable de esta industria. Como consecuencia, se ha experimentado una paulatina pérdida de la productividad en las últimas décadas, por lo que la producción se ha mantenido a través de constantes incrementos en la superficie cultivada, con los impactos en los servicios ecosistémicos que ello conlleva.

Aunado a ello, factores como la escasa diversificación de la producción, y la pérdida de competitividad de la industria cañera mexicana en el entorno internacional, ha propiciado el cierre paulatino de ingenios, la acentuación del oligopolio y la incursión de la inversión extranjera.

El caso de la industria cañera en San Luis Potosí es particularmente preocupante, ya que cuenta con la productividad en campo más baja de las 15 entidades productoras. Tres cuartas partes de sus terrenos no cuentan con riego y la precipitación en la región no es suficiente para que el cultivo se desarrolle de forma óptima. Además, la mayor parte de sus plantaciones son viejas (en resoca), y más del 70% se encuentra cultivada con variedades desarrolladas hace más de 50 años.

No obstante, si bien el factor socioeconómico no se ha atendido, al tema del impacto ambiental se le ha conferido aún menos importancia. Prueba de ello son las prevalecientes prácticas en los sistemas productivos e industriales que afectan los servicios ecosistémicos a diferentes escalas.

Uno de ellos es la cosecha por el método de quema o mejor dicho, de doble quema, ya que se realiza un primer incendio previo a la cosecha con el objetivo de reducir costos y otro posterior a esta, con la idea de eliminar residuos de plagas y enfermedades e incrementar la productividad del siguiente ciclo (aunque se ha comprobado que esta práctica es más perjudicial que benéfica).

En México, se continúa realizando esta práctica en una importante proporción de la superficie cañera. En San Luis Potosí, durante la zafra 2021-2022, se quemó más del 70% de la superficie cosechada. Actualmente existen métodos confiables que complementan la información estadística en la ubicación de la superficie que se quema y el grado de severidad de los incendios.

Algunos de estos métodos son los índices espectrales como el NBR (Índice Normalizado de Severidad de Quema), el cual se utilizó en esta investigación para corroborar la información estadística de CONADESUCA, concluyendo que, existen diversos factores como la superficie cosechada; la productividad, traducida en toneladas por hectárea; el método de quema y la severidad de la misma, entre otros, que determinan la caña que se quema y con ello, la calidad del aire.

Sin embargo, esta no es la única actividad que implica procesos de combustión; también está el afluente de vehículos de carga pesada durante la temporada de zafra y la quema de combustibles fósiles y bagazo de que caña que realizan los ingenios azucareros durante su proceso de industrialización, entre otros. Cuando se realizan estos procesos se emite una importante cantidad de contaminantes del aire que produce diversas afectaciones para el ambiente y la salud humana.

Uno de estos contaminantes es el carbono negro (BC), un contaminante atmosférico de vida corta, capaz de retener la luz, absorberla y transformarla en calor. Al ser el segundo precursor de cambio climático y estar asociado a otros contaminantes que afectan la salud de los seres humanos, se considera un importante indicador para el ambiente y la salud humana.

Durante la COP 21, México estableció una meta no condicionada de reducción de 22% de sus gases de efecto invernadero (GEI) y de 51% de su BC, para el año 2030. Con el objeto de monitorear el avance en el cumplimiento de sus metas, el Instituto Nacional de

Ecología y Cambio Climático (INECC) realiza el Inventario Nacional de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INGYCEI), utilizando como principal método de estimación, los factores de emisión.

Según este método, las emisiones nacionales de BC se redujeron en 16.4% entre 2013 y 2021; sin embargo, esta tasa resulta insuficiente para contribuir efectivamente al logro de las metas comprometidas en la COP21.

Asimismo, se pudo observar que al menos 90% de las emisiones provienen de los ingenios azucareros, y que la región Golfo, integrada en su mayoría por municipios de Veracruz, es la más contaminante del país.

Por su parte, la región noreste, en donde se encuentra San Luis Potosí, la superficie industrializada creció 8.1% pero los rendimientos sufrieron una importante caída; en campo la productividad se redujo en 22.5% mientras que la agroindustrial fue 22.7% menor. Por lo anterior, la producción de azúcar de la región cayó en 17.1%. En lo referente al impacto ambiental, los ingenios de esta región redujeron el uso de combustóleo en 7.2% pero continúan siendo los que más lo utilizan (60% del total del sector). La cosecha por el método de quema descendió en 18.4% y el BC emitido se incrementó en 14.6% para alcanzar las 4,238 toneladas en 2021.

A través de diversas investigaciones, los factores de emisión se han vuelto cada vez más específicos, lo que ha contribuido al incremento en la certidumbre de las estimaciones del inventario. No obstante, a la par han surgido técnicas y metodologías que permiten verificar la información obtenida con los cálculos. Por ejemplo, actualmente existen diversos satélites equipados con sensores para el monitoreo ambiental que permiten el acceso a sus productos, en tiempo cuasi real.

Con técnicas como el análisis multicriterio se pueden combinar y ponderar índices e imágenes de satélite para crear índices de calidad ambiental (ICAs) que, con una mayor cantidad de argumentos, robustecen los resultados obtenidos.

Esta técnica se aplicó para la zona de abasto de los ingenios establecidos en San Luis Potosí, durante la cosecha 2021-2022. A través del uso de los índices NBR y EVI (Índice de Vegetación Mejorado), la variable temperatura del suelo (TS) y las imágenes MERRA-2 de monitoreo de BC, se propuso un Índice de Calidad Ambiental (ICA).

Durante el mes de enero de 2022, cuando se alcanzó el pleno de la zafra, se obtuvo el peor ICA, ya que se tuvo la mayor concentración de BC, el mayor NBR y el EVI más bajo. Durante el resto de los meses de la zafra, el ICA no rebasó el nivel de regular, pero se incrementó hasta llegar a niveles buenos, posterior a su culminación.

También se pudo apreciar una diferencia en el ICA en las diferentes áreas de abasto de los ingenios; lo cual está relacionado con las características de los distintos procesos agrícolas y agroindustriales, como el método de cosecha (por quema o en verde); la modernización de maquinaria y equipo del ingenio; así como la incorporación de equipo para reducir la emisión de contaminantes, como los filtros en las chimeneas, entre otros.

Con todo y lo anterior, la afectación de los servicios ecosistémicos ocasionados por la industria cañera no se limita al aire, sino que también incluye el suelo, el agua, la biodiversidad y diversos aspectos del bienestar humano, por mencionar algunos.

Todas estas afectaciones se pueden traducir en impactos cuantificables. A través de su categorización se pueden homogeneizar las unidades y asignarles un costo económico estimado. Por ejemplo, se encontró que el ciclo de vida de la caña de azúcar afecta siete servicios ecosistémicos: calentamiento global, acidificación de suelo y agua, eutrofización, agotamiento de combustibles fósiles, toxicidad humana y ecotoxicidad de agua dulce y salada. Investigadores de diversos países han sentado las bases para estimar los costos por la afectación de estos servicios, con diferentes enfoques.

En esta investigación se realizó una aproximación de la estimación de costos con dos enfoques; el primero referido a la afectación en la salud humana por la exposición directa a la contaminación del aire, tomando como estudio de caso la población de Ciudad Valles, San Luis Potosí, expuesta a BC. Se estimó un costo aproximado de 517 mil dólares cuando la concentración de BC excede en una unidad la concentración máxima de referencia de la Organización Mundial de la Salud (OMS), cuando la población total de Ciudad Valles ha estado expuesta. Además, se crearon escenarios en donde se varió la concentración del BC, la población expuesta y la proporción de BC contenida en las partículas PM_{2.5}.

En el segundo enfoque, se estimaron los costos ocasionados por la pérdida de servicios ecosistémicos de las zonas cañeras que abastecen a los cuatro ingenios que operan en el estado de San Luis Potosí, durante la etapa de producción del ciclo de vida de la caña de azúcar. Bajo este enfoque, el costo estimado fue de 642 millones de dólares.

Se concluye que la industria cañera de México y particularmente la de San Luis Potosí se encuentra en una crisis multifactorial caracterizada por reducción de la demanda, pérdida de la competitividad en el entorno internacional, baja productividad y escasa diversificación de la producción. Además, la industria resulta de alto impacto ambiental, afectando diversos servicios ecosistémicos y ocasionando costos que no son cubiertos por sus causantes.

Por ello, urge un programa integral que contemple las características específicas de cada región cañera de México, y que impulse la actividad desde el punto económico y social, privilegiando sistemas de producción e industrialización que reduzcan al mínimo posible el impacto de esta industria en los servicios ecosistémicos, y que incluya una política ambiental pertinente y operativa, y un sistema de vigilancia permanente.

Palabras clave: Situación, crisis, impactos, servicios ecosistémicos, valoración.

ABSTRACT

Sugarcane (*Saccharum officinarum*) is a herbaceous plant in the grass or poaceae family, the most important group of plants for human nutrition. It includes species such as wheat (*Triticum spp.*), corn (*Zea mays*), rice (*Oryza sativa*), sorghum (*Sorghum vulgare*), barley (*Hordeum vulgare*), and rye (*Secale cereale*), among others.

Most sugarcane production is consumed in some of its industrialized forms, making production almost inseparable from its agroindustry.

Its domestication and use date back more than 3,000 years, although its massive demand as a sweetener for beverages and food in Europe began in the 8th AD. In the following centuries and with the discovery of America, the growing demand was met by the cultivation of sugar in large extensions of the new continent.

The value of cane sugar and the lack of regulation of its marketing, together with phenomena such as droughts and floods, political unrest, and economic crises, led to a sharp rise in sugar prices.

In the last decades of the 20th century, some of the main consumers of sugar were the soft drink and confectionery industries, which opted to use substitutes such as high fructose corn syrup in their formulations due to price instability.

In terms of direct consumption, consumption patterns have shifted toward low-calorie products, and many consumers have begun to opt for artificial sugar substitutes and, more recently, natural derivatives such as stevia sugar and monk fruit.

All this has led to a decline in per capita consumption of cane sugar, and aggregate demand has been sustained only by the demographic explosion in some low-income countries, especially in Asia.

In Mexico, this problem has been exacerbated by the lack of policies to promote the sustainable development of this industry. As a result, there has been a gradual loss of productivity in recent decades, so that production has been sustained by a constant expansion of cultivated land, which has affected ecosystem services.

In addition, factors such as the low diversification of production and the loss of competitiveness of the Mexican sugarcane industry in the international environment have led to the gradual closure of sugar mills, the tightening of the oligopoly and the penetration of foreign investment.

The case of the sugarcane industry in San Luis Potosí is particularly worrisome because it has the lowest field productivity of the 15 producing states. Three-quarters of the cultivated land is not irrigated and rainfall in the region is insufficient to ensure optimal crop development. In addition, most plantings are old (in resoca) and more than 70% are grown with varieties developed more than 50 years ago.

However, while the socioeconomic factor has not been considered, the issue of environmental impact has been given even less importance. Evidence of this is the

prevailing practices in production and industrial systems that affect ecosystem services at different levels.

One of these is harvesting by burning, or rather double burning, as an initial fire is set before harvest to reduce costs and another after harvest to remove pest and disease residues and increase productivity for the next cycle (although it has been proven that this practice is more detrimental than beneficial).

In Mexico, this practice continues to be used on much of the sugarcane area. In San Luis Potosí, more than 70% of the harvested area was burned during the 2021-2022 harvest. Currently, there are reliable methods that complement the statistical information on the location of the burned area and the severity of the fires.

Some of these methods are spectral indices such as the NBR (Normalized Burn Severity Index), which was used in this research to corroborate CONADESUCA's statistical information, concluding that several factors such as the harvested area, productivity converted to tons per hectare, the method of harvest and the burning severity, among others, determine the sugarcane burned and, consequently, the air quality.

However, this is not the only activity associated with combustion processes; there is also the influx of heavy vehicles during the harvest season and the burning of fossil fuels and sugarcane bagasse by sugar mills during the industrialization process, to name a few. These processes release a significant amount of air pollutants that affect the environment and human health.

One of these pollutants is black carbon (BC), a short-lived air pollutant capable of storing and absorbing light and converting it to heat. As a second precursor to climate change, and in conjunction with other pollutants that affect human health, it is considered an important indicator of environmental and human health.

During COP21, Mexico established an unconditional goal of reducing 22% of its greenhouse gases (GHG) and 51% of its BC by 2030. In order to monitor progress in meeting its goals, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) carries out the Inventario Nacional de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INGYCEI), using emission factors as the main estimation method.

According to this methodology, the BC country's national emissions were reduced by 16.4% between 2013 and 2021, but this is not enough to effectively contribute to the goals to which COP21 committed.

It was also noted that at least 90% of emissions come from sugar mills, and that the Gulf region, composed mainly of municipalities in Veracruz, is the most polluting region in the country.

In the northeastern region, where San Luis Potosí is located, the industrialized area grew by 8.1%, but yields decreased significantly; field productivity fell by 22.5%, while agroindustrial productivity was 22.7% lower. As a result, sugar production in the region decreased by 17.1%. In terms of environmental impact, mills in this region reduced their

fuel oil consumption by 7.2% but remain the largest consumers of fuel oil (60% of total consumption in the sector). Harvesting by the burning method decreased by 18.4% and BC emissions increased by 14.6% to 4,238 tons in 2021.

Through various research studies, emission factors have become increasingly specific, which has helped to increase the certainty of inventory estimates. At the same time, however, techniques and methods have been developed to verify the information obtained from the calculations. For example, there are currently several satellites equipped with environmental monitoring sensors that provide quasi-real-time access to their products.

With techniques such as multicriteria analysis, it is possible to combine and weight indices and satellite images to produce environmental quality indices (UQI) that use a larger number of arguments to strengthen the results obtained.

This technique was applied to the sugar mills' service area in San Luis Potosí for the 2021-2022 harvest. By using the NBR and EVI (Enhanced Vegetation Index) indices, the variable soil temperature (TS) and the MERRA-2 images of BC monitoring, an Environmental Quality Index (EQI) was proposed.

January 2022, the month of full harvest, had the worst AQI value, as it had the highest BC concentration, the highest NBR value, and the lowest EVI value. In the other months of the harvest, the AQI did not exceed the regular level, but increased until it reached good levels after the end of the harvest.

This is related to the characteristics of the different agricultural and agro-industrial processes, such as the harvesting method (burning or green harvesting), the modernization of machinery and equipment in the mills, and the installation of devices to reduce pollutant emissions, such as filters in the stacks and others.

However, the impacts on ecosystem services caused by the sugarcane industry are not limited to air, but also include soil, water, biodiversity, and various aspects of human well-being, to name a few.

All of these impacts can be converted into quantifiable values. By categorizing them, the units can be homogenized and assigned an estimated economic cost. For example, the sugarcane life cycle was found to affect seven ecosystem services: global warming, soil and water acidification, eutrophication, fossil fuel depletion, human toxicity, and freshwater and saltwater ecotoxicity. Researchers from several countries have laid the groundwork for estimating the costs of degradation of these services, using a variety of approaches.

In this research, an approximation of costs was made using two approaches; the first related to the human health impairment caused by direct exposure to air pollution, using as a case study the population of Ciudad Valles, San Luis Potosí, exposed to BC. If the BC concentration exceeds the World Health Organization (WHO) maximum reference concentration by one unit, a cost of approximately 517 thousand dollars was estimated for the entire population of Ciudad Valles. Scenarios were also created varying the BC concentration, the exposed population, and the proportion of BC in PM_{2.5} particles.

The second approach estimated the costs caused by the loss of ecosystem services in the sugarcane areas that supply the four sugar mills operating in the state of San Luis Potosí during the production phase of the sugarcane life cycle. Using this approach, the estimated cost was USD 642 million.

It is concluded that the sugarcane industry in Mexico, and in San Luis Potosí in particular, is in a multifactorial crisis characterized by a decrease in demand, loss of competitiveness in the international environment, low productivity, and low diversification of production. In addition, the industry has a strong impact on the environment, affecting various ecosystem services and generating costs that are not covered by the polluters.

Therefore, there is an urgent need for a comprehensive program that takes into account the specific characteristics of each sugarcane growing region in Mexico and promotes the activity from an economic and social point of view, favoring production and industrialization systems that reduce as much as possible the impact of this industry on ecosystem services, and that includes a relevant and operational environmental policy and a permanent monitoring system.

Keywords: Situation, crisis, impacts, ecosystem services, valuation.

I. LA AGROINDUSTRIA CAÑERA EN MÉXICO Y LOS FACTORES QUE HAN DETERMINADO SU HISTORIA RECIENTE (1961-2021)

THE SUGAR CANE AGROINDUSTRY IN MEXICO AND THE FACTORS THAT HAVE DETERMINED ITS RECENT HISTORY (1961-2021)

REVISTA INCLUSIONES ISSN 0719-4706 VOLUMEN 9 – NÚMERO ESPECIAL – ENERO/MARZO 2022

**REVISTA
INCLUSIONES** M.R.
REVISTA DE HUMANIDADES
Y CIENCIAS SOCIALES

**CUADERNOS DE SOFÍA
EDITORIAL**

ISSN 0719-4706 - Volumen 9 / Número Especial / Enero – Marzo 2022 pp. 41-70

LA AGROINDUSTRIA CAÑERA EN MÉXICO Y LOS FACTORES QUE HAN DETERMINADO SU HISTORIA RECIENTE (1961-2021)

THE SUGAR CANE AGROINDUSTRY IN MEXICO AND THE FACTORS THAT HAVE DETERMINED YOUR RECENT HISTORY (1961-2021)

Mtro. Pedro Pérez Medina

Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Posgrado Multidisciplinario en Ciencias Ambientales, México

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-9746-8037>

A35047@alumnos.uaslp.mx

RESUMEN

La agroindustria de la caña de azúcar goza de importancia social y económica en todo el mundo, desde hace varios siglos. No obstante, a lo largo de su historia ha enfrentado graves problemas que han puesto en riesgo su permanencia. En México, uno de los principales países productores, esta situación se ha agravado por factores como las diferentes políticas agrícolas adoptadas a través de los años. El abandono de la agroindustria por el gobierno y los particulares ha provocado que los sistemas de producción e industrialización se vuelvan obsoletos e ineficiente. Actualmente, se enfrentan problemas financieros y pérdida de competitividad en el entorno internacional. El objetivo del presente artículo es hacer un análisis en su contexto histórico de los últimos 60 años, mediante algunos indicadores, y presentar propuestas de mejora.

Palabras clave

Factores históricos, entorno nacional, crisis, alternativas.

ABSTRACT

Sugarcane agroindustry has a significant social and economic importance throughout the world since several centuries ago. However, throughout its history, it has faced serious problems that have put its permanence at risk. In Mexico, one of the main producer countries, the situation has been exacerbated by factors such as the agricultural policies adopted over the years. The abandonment of the agroindustry by the government and owners has caused production and industrialization systems to become obsolete and inefficient. At present, mexican sugarcane facing financial problems and competitiveness loss in the international environment. The objective of this paper is to make an analysis of the agroindustry historical context of the last 60 years, through the use of some indicators, and to submit suggestions for improvement.

Keywords

Historical factors, national environment, crisis, alternatives.

1. INTRODUCCIÓN

Durante la zafra 2020-2021 operaron 49 ingenios en 15 estados de la república mexicana, en condiciones heterogéneas y con enormes diferencias en sus productividades (Figura 1).

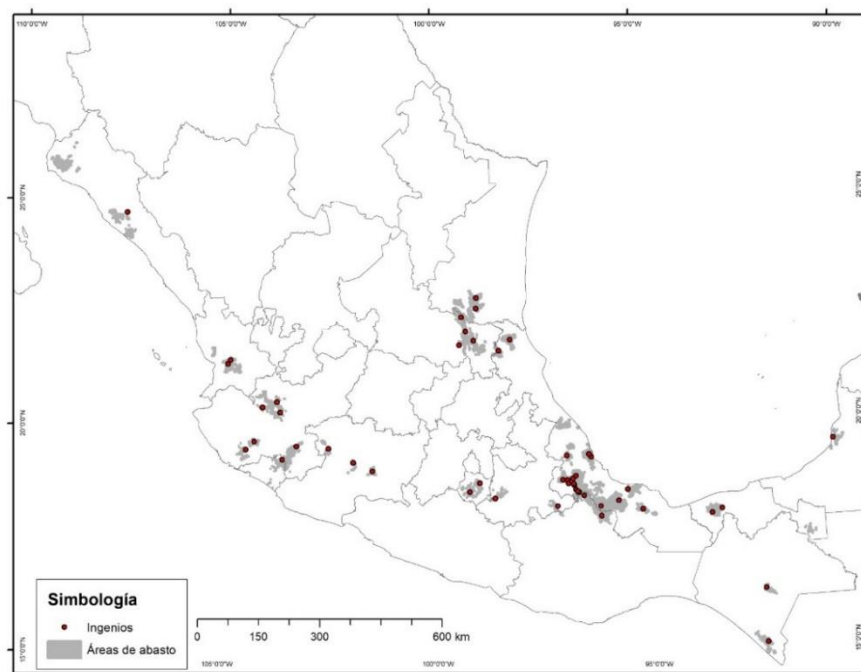


Figura 1. Ingenios y zonas cañeras de México.
Fuente: Elaboración propia con información de SIAP, 2021.

La caña de ha atravesado por una historia de fenómenos políticos, sociales y naturales que han propiciado su declive como cultivo y agroindustria en repetidos momentos. No obstante, el factor de los precios ha jugado un papel determinante en el rumbo que ha tomado, ya que ha afectado la oferta y la demanda hasta el punto de desalentar de forma permanente el consumo.

A través de numerosas investigaciones se ha detectado una gran cantidad y variedad de factores específicos que han incidido en la problemática actual de la agroindustria cañera en México. Por un lado, están los factores productivos, entre los que destaca un escaso manejo de residuos; la realización del surcado en dirección de la pendiente del terreno; láminas de riego irregulares y pesadas, así como fertilización “genérica”; es decir, que no se realiza en base a las condiciones particulares del suelo. En el mismo sentido, está el uso indiscriminado de agroquímicos y la sobreexplotación de plantaciones con variedades no adaptadas a las condiciones actuales.¹

Los factores climáticos requieren especial atención al ser determinantes para la producción; la temperatura y la precipitación son fundamentales en el rendimiento y la calidad. Cuando las plantaciones no cuentan, de forma natural, con los 1,300 milímetros de agua que requieren para mantener su productividad, se hace necesario el riego para suplementar dicha necesidad.²

También existe una problemática que se vive en fábrica, la cual está caracterizada por una apremiante necesidad de flexibilizar y automatizar los procesos, la administración de la energía, así como de programas continuos de mantenimiento preventivo y predictivo.

La competitividad territorial como los servicios disponibles y los aspectos sociales. El trabajo colectivo, la firma de contratos, la capacitación y asistencia técnica, la contratación de mano de obra y el uso del crédito, son servicios que tienen efecto sobre el rendimiento de la caña de azúcar. Lo mismo sucede con el nivel educativo, las condiciones de la vivienda y la conectividad (vías de comunicación), que muestran una relación positiva y directa con la productividad en campo.³

En las cuestiones administrativas, destaca la innecesaria complejidad funcional, poca profesionalización en la comercialización y falta de incorporación a esquemas ISO. Además, se suma la incipiente diversificación en la producción, la cual debería de estar

¹ Miguel Gerardo Ochoa Neira; Marcos Reyes García y José Antonio Manríquez Núñez. Producción Sostenible de Caña de Azúcar en México. FIRA Boletín Informativo, editado por Liliana Ruede Alcocer (SEPRIM Servicios Profesionales en Impresión, 2010), 65.

² Noe Aguilar Rivera; Marcos Algara Siller y Luis Alberto Olvera Vargas. “Gestión del agua como factor limitante de productividad cañera en México”. Revista de Geografía Norte Grande 60 (2015): 135-142. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022015000100008>.

³ Katia Angélica Figueroa Rodríguez; Ana María Teresa García García; Yesica Mayett Moreno; Francisco Hernández Rosas y Benjamín Figueroa Sandoval. “Factores que explican el rendimiento de caña de azúcar a nivel municipal en México”. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 6: 6 (2015): 1345-1358. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i6.581>.

orientada a en los sectores como el energético y el farmacéutico, entre otros. Finalmente, los altos costos derivados del atraso en la tecnificación e innovación de los sistemas productivos, también afectan la industria.⁴

A nivel macro, el mal manejo del financiamiento, la apertura comercial mal planeada, los planes y programas de apoyo poco eficientes, así como una ineficiente regulación del dumping y la privatización han incidido en la problemática que actualmente vive esta agroindustria nacional.

2. CONTEXTO HISTÓRICO

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) pertenece a la familia de las gramíneas, el grupo de plantas de mayor importancia económica en el mundo. Tuvo su centro de origen en Nueva Guinea, y se cultivó por primera vez en el sureste asiático. Varios siglos más tarde, fue introducido en Egipto, donde se produjo azúcar refinada por primera vez.⁵

En la alta Edad Media alcanzó popularidad en toda Europa al ser el ingrediente principal en varios platos y bebidas. Después del descubrimiento y colonización del continente americano, se introdujo el cultivo en las islas del Caribe y posteriormente, al resto del continente.⁶

Durante la Guerra Civil de los Estados Unidos (1861-1865), los insumos para la producción de azúcar colapsaron cuando los esclavos abandonaron las plantaciones en Luisiana.⁷ Para entonces, el país producía más del 10% del azúcar mundial y este suceso triplicó los precios en tan sólo 3 años. Al término de la guerra.⁸

A inicios del siglo XX, la especulación que caracterizó los años previos a la gran depresión se permeó a la agroindustria cañera, y los especuladores con su estrategia de acaparamiento, terminaron por desencadenar una crisis desenfrenada en el sector para

⁴ Noe Aguilar Rivera; Guadalupe Galindo Mendoza; Javier Fortanelli Martínez y Carlos Contreras Servín. "Factores de competitividad de la agroindustria de la caña de azúcar en México". Región y Sociedad XIII: 52 (2011). 261-697. <http://dx.doi.org/10.22198/rys.2011.52.a188>.

⁵ Abraham Singels; Phillip Jackson y Geoff Inman-Bamber. "Chapter 21-Sugarcane". En "Crop Physiology Case Histories for Major Crops". Editado por Victor O. Sadras y Daniel F. (Calderini: Academic Press, 2021), 674-713.

⁶ Winton. The Sweet and Sour History of Sugar Prices. A recent report described a commodity trader buying up thousands of swimming pools' worth of sugar, potentially moving the market. 2017. <https://www.winton.com/longer-view/the-sweet-and-sour-history-of-sugar-prices> (consultada el 2 de septiembre de 2021).

⁷ Igor Josipović, y Marko Vujeva. "Economic Aspects of Slavery in the Triangular Trade in the Early Modern Period." Journal of Gazi Academic View 14:28 (2021): 179–97.

⁸ Winton. The Sweet and Sour...

finales de los años veinte.⁹ Además, los movimientos sociales y políticos de Cuba también jugaron un papel determinante para la reconfiguración del mercado mundial del azúcar. Después del término de la revolución cubana en 1959, la isla entró en un conflicto con Estados Unidos que culminó con el bloqueo económico y comercial a la isla a partir de 1962.¹⁰ Para esos años, Cuba era el tercer productor de caña de azúcar, el segundo exportador de azúcar del mundo y el primer proveedor de Estados Unidos. Derivado del bloqueo, el país perdió la importancia que tenía por esos años.¹¹

Al inicio de la década de los setenta, el azúcar volvió a escasear a causa de una sequía mundial.¹² Aunado a ello, una serie de disturbios políticos y sociales en el mundo y la devaluación del dólar propiciaron un incremento de 80% en los precios en sólo un año. Para noviembre de 1974 se pagaban 65 centavos por libra de azúcar; 1,200% más que en 1971.¹³ Sin imaginarlo, estas alzas redujeron el consumo del azúcar y orillaron a los dueños de las empresas que la utilizaban como insumo a buscar sustitutos menos costosos. No es coincidencia que, en 1974, Coca Cola modificara su fórmula para permitir el jarabe de maíz con alto contenido de fructosa en algunos de sus productos. Acto seguido, para 1984 ya todos sus productos eran edulcorados con este sustituto.¹⁴

A partir de estos años, el consumo indirecto del azúcar se redujo drásticamente por la modificación en las fórmulas de la industria de las bebidas y los alimentos procesados, así que la demanda se ha logrado mantener solo gracias al creciente consumo directo, sobre todo, de los países en vías de desarrollo.

⁹ Brian H. Pollitt. "The Cuban Sugar Economy and the Great Depression." *Bulletin of Latin American Research* 3:2 (1984): 3–28. <https://doi.org/10.2307/3338249>.

¹⁰ Antonio Santamaría García. "Un país De Azúcar: Crecimiento Y Crisis De La economía Azucarera Cubana, De La Independencia a La Crisis De Los años Treinta". Op. Cit. *Revista Del Centro De Investigaciones Históricas* 15 (2018): 191-244.

¹¹ Willard W. Radell. "Cuban-Soviet Sugar Trade, 1960-1976: How Great Was the Subsidy?" *The Journal of Developing Areas* 17:3 (1983): 365–82. <http://www.jstor.org/stable/4191149>.

¹² Jonathan Derrick. "The Great West African Drought, 1972-1974." *African Affairs* 76, no. 305 (1977): 537–86. <http://www.jstor.org/stable/721780>.

¹³ Royce A. Ballinger. *A History of Sugar Marketing Through 1974*. U. S. Department of agriculture / Economics, statistics, and cooperatives service agricultural economic report no. 382 (Washington, D. C.: U. S. Government Printing Office, 1978), 98. <https://www.ers.usda.gov/publications/pub-details/?pubid=40540>.

¹⁴ Tom Philpott. *The Secret History of Why Soda Companies Switched From Sugar to High-Fructose Corn Syrup*. <https://www.motherjones.com/food/2019/07/> (consultada el 3 de octubre de 2021).

2.1. La caña de azúcar en México

A la llegada de los españoles al continente americano, los españoles trajeron la caña de azúcar que cultivaron Santo Domingo, República Dominicana, y para finales del siglo XVI, América Latina ya se había convertido en el principal proveedor de azúcar de España.¹⁵

En México, Veracruz ofreció terrenos ideales para el desarrollo del cultivo, y su creciente importancia económica propició una expansión vertiginosa por todo el territorio nacional, particularmente en Michoacán, Jalisco, Puebla y Morelos.¹⁶ Pese a las condiciones deplorables de los trabajadores, la industria azucarera logró expandirse y para el siglo XVIII, México ya contaba con 300 haciendas cañeras que abastecían a trapiches e ingenios.¹⁷ Sin embargo, la pugna por el poder económico y político del país desató La Guerra de Independencia, que inició el 15 de septiembre de 1810, con una intensa lucha que transformó las estructuras organizativas. Durante este periodo, muchos cañaverales e ingenios fueron destruidos.¹⁸

A casi un siglo de la independización de México, estalló un nuevo conflicto armado en 1910 conocido como La Revolución Mexicana; una guerra civil ocasionada por la autocracia del gobierno y los excesos de la clase alta en contra de los pobres.¹⁹ Los estados cañeros participaron de forma activa e influyeron en el inicio de la contienda. Abanderados por Emiliano Zapata, exigían la propiedad de los terrenos donde producían.²⁰

En 1915 se comenzó la Reforma Agraria, que representó un avance en la distribución de terrenos agrícolas del país. En 1921, de entre los vestigios de los ingenios cañeros, se reactivó la agroindustria con lo que se logró triplicar la producción. Para mantener esta

¹⁵ Hermilio Hernández Ayón y Francisco Javier Hernández Ayón. "La caña de azúcar en su contexto histórico" en *El sector cañero de Nayarit desde una perspectiva organizacional y ambiental*, editado por Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso. 2013. 4-33. <http://www.eumed.net/libros/gratis/2013a/1333/index.htm>.

¹⁶ Aguilar Rivera. "Diversificación productiva de la industria azucarera ¿Reto tecnológico, económico o social?". *Mundo siglo XXI* 18 (2009): 53–66.

¹⁷ Noe Aguilar Rivera. "La caña de azúcar y sus derivados en la huasteca San Luis Potosí, México". *Diálogos Revista Electrónica de Historia* 11:1 (2010): 81-110. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1409-469X2010000100003&lng=en&tlng=es.

¹⁸ Ernest Sánchez Santiró. "Evolución productiva de la agroindustria azucarera de Morelos durante el siglo XIX: una propuesta de periodización". *América Latina en la historia económica* 26 (2006): 109-127. <https://doi.org/10.18232/alhe.v13i2.382>.

¹⁹ Virginie Thiébaud y Luis Alberto Montero García. "Cañaverales, trapiches e ingenios en México. Dinámicas históricas y procesos actuales". *Ulúa* 23 (2014): 11-19. <https://doi.org/10.25009/urhsc.v1i2.3.1186>.

²⁰ Christine Rufino Dabat. "El Azúcar en América Latina y el Caribe. Cambio tecnológico, trabajo, mercado mundial y economía azucarera. Perspectiva histórica y problemas actuales", editado por Horacio Crespo. Ciudad de México: Senado de la República. *Las Américas* 68: 2 (2006): 283-285. <https://doi.org/10.1017/S0003161500001036>.

tendencia, el gobierno implementó un programa de créditos para mejorar la productividad, que fomentó la actividad, hasta la gran depresión de 1929.

El desabasto de azúcar global ocasionado por la segunda guerra mundial ofreció el escenario propicio para que los especuladores retiraran su azúcar del mercado, obligando al país a importar producto, que ya para entonces era deficitario. Debido a ello, en 1943 se creó el primer decreto cañero, que obligaba a los productores de las zonas cañeras a producir caña, y a los ingenios a comprárselas. Con dos decretos subsecuentes, se fomentó la producción que, ya para 1945 se cultivaba en 25 mil hectáreas y producía 1 millón de toneladas de azúcar.²¹

Durante La Revolución Verde, adoptada en México desde 1950 implicó una alta tecnificación y dependencia de agroquímicos. No obstante, durante los años sesenta y setenta, los bajos precios internacionales del azúcar, las políticas nacionales de financiamiento y el control de los precios, propiciaron una crisis financiera en varios ingenios que desembocó en desabasto en el mercado interno. Ante esta situación, el Estado volvió a intervenir en el mercado autorizando importaciones del producto, adquiriendo ingenios o financiando sus deudas y creando instituciones para el desarrollo de la agroindustria.²²

En 1982, México negoció su más grande crisis de sobreendeudamiento con Estados Unidos, permitiendo la intromisión del Banco Mundial (BM) y el Fondo Monetario Internacional (FMI) en su política interna,²³ lo que lo condujo al neoliberalismo.²⁴

Una década más tarde, en diciembre de 1992, se firmó el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) con Estados Unidos y Canadá, el cual entró en vigor en enero de 1994. Con ello, se comenzó un proceso en el cual se privatizó casi 80% de las empresas paraestatales y control de la oferta monetaria.²⁵ Los integrantes de la cadena (gobierno, ingenios y dueños de las tierras) no tomaron las medidas necesarias en lo referente a costos, calidad del producto y sostenibilidad social y ambiental, para enfrentar

²¹ Virginie Thiébaud y Luis A. Montero García. "Los actores del azúcar: cortadores, cañeros, obreros y grupos empresariales, siglos XIX-XXI". *Ulúa* 29 (2017): 11-19. <https://doi.org/10.25009/urhsc.v0i29.2548>.

²² Margarita Torres Úlloa; Ricardo G. Acosta Reyes, Bernardo G. Juárez Olascoaga. "El desempeño de la industria azucarera en México y su competitividad". *Eseconomía* 16 (2007): 33-59. <http://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/15246>.

²³ Carlos Tello. "Estancamiento económico, desigualdad y pobreza 1982-2009". *ECONOMÍAUnam* 7: 19 (2010): 5-44. <https://doi.org/10.22201/fe.24488143e.2010.019.173>.

²⁴ Eric Toussaint. "Capítulo 10. El banco mundial y la crisis de la deuda del tercer mundo". En *La bolsa o la vida. Las finanzas contra los pueblos* (Buenos Aires: CLACSO, Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales, 2004), 148-155.

²⁵ CISE (Sistema de Información Sobre Comercio Exterior). Canadá-Estados Unidos-México (TLCAN/NAFTA). http://www.sice.oas.org/tpd/nafta/nafta_s.asp (consultada el 16 de septiembre de 2021).

las nuevas condiciones del entorno; por lo que varios de los indicadores de la agroindustria han ido decayendo paulatinamente.

Como consecuencia, varios ingenios han enfrentado problemas financieros, ante lo cual, varios programas de financiamiento, regulación y desregulación del mercado, así como privatización y desprivatización de la industria han sido algunas de las acciones tomadas por el gobierno para intentar salvar al sector.²⁶

No obstante, en los últimos 20 años ha dejado de operar 18% de los ingenios del país, al pasar de 60 a 50 industrias moliendo del año 2000 al 2020; y durante la zafra 2020-2021, dejó de funcionar un ingenio más.

Este artículo tiene la finalidad de complementar las investigaciones realizadas hasta el momento con el objetivo de contar con más elementos de análisis que sirvan para realizar propuestas más y mejor fundamentadas, que coadyuven en la actual situación de crisis que vive la agroindustria cañera nacional.

3. ENTORNO INTERNACIONAL

3.1. Oferta

3.1.1. Producción

La producción mundial de azúcar proviene de la caña de azúcar en 86.0%. Para abastecer a la creciente población del planeta, el volumen producido de caña se ha incrementado en 300.0% en los últimos 60 años, al pasar de 448 a 1,774 millones de toneladas por año, de 1961 a 2021.²⁷ Lo anterior representa un incremento promedio anual de 4.9%; es decir, 24 millones de toneladas por año. Este incremento en la producción se puede explicar, en parte, por el constante aumento en los rendimientos en campo, los cuales pasaron de 50.3 a 72.6 toneladas por hectárea (44.5% más) (Figura 2).

²⁶ CEFPE (Centro de Estudios de las Finanzas Públicas de la Cámara de Diputados). La agroindustria azucarera en México. México, D. F. 2001. <https://www.cefp.gob.mx/intr/edocumentos/pdf/cefp/cefp0392001.pdf>.

²⁷ OECD/FAO (Organization for Economic Cooperation and Development/Food and Agriculture Organization). "Azúcar" en OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030 (París: OECD Publishing, 2021), 167-180. <https://doi.org/10.1787/3463d2a1-es>.

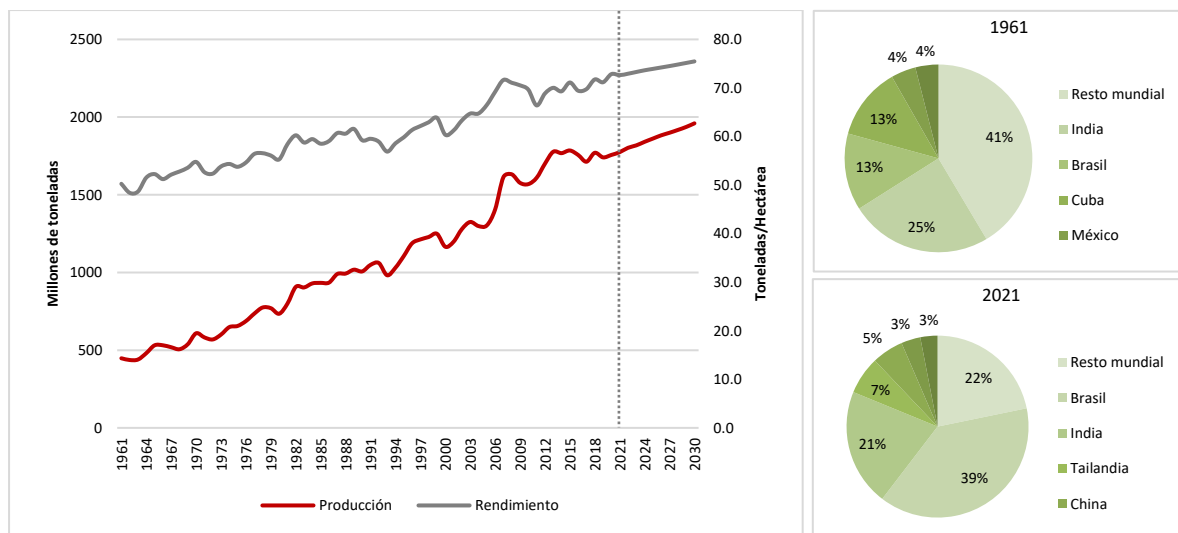


Figura 2. Producción y rendimiento mundiales de caña de azúcar.

Fuente: Elaboración propia con datos de FAO y OCDE/FAO, 2021.

Uno de los cambios más notorios es el de Cuba que, en 1961 era el tercer país con más producción de caña y el primer proveedor de azúcar de los Estados Unidos. Sin embargo, posteriormente, debido a sus conflictos internos, y al embargo comercial que los norteamericanos le impusieron en 1962, la isla salió por completo de la escena mundial de la caña. En su lugar, varios países asiáticos se han convertido en potencias, como China que dedica la mayor parte de su producción al consumo doméstico y Tailandia, el tercer productor actual de caña, que es netamente exportador.

En 2021, Brasil se erige como el principal productor mundial, con 39.0% del total. En conjunto con India produce 60.0% de la caña del mundo, por lo que tienen una gran injerencia en los precios internacionales del azúcar.

Desde la década de los noventa, Brasil incursionó a la producción de etanol hecho a partir de la caña de azúcar, por lo que ahora tiene la opción de dedicar su producción a la elaboración de azúcar o al biocombustible, dependiendo de las condiciones del mercado. México por su parte, pasó del 4º al 6º lugar, reduciendo su participación mundial en 1.3%.

Se espera que en la siguiente década la producción de azúcar se incremente a un ritmo de 1.4% anual, por efecto del incremento en los precios, proveniente de una mayor demanda. Para 2030, países como Egipto, Estados Unidos, Rusia, China Turquía y Ucrania incrementarán su producción, en tanto que los países de la Unión Europea la reducirán. En general, se espera que los mayores incrementos tengan lugar en los países en vías de desarrollo, que se prevé representarán 79.0% de la producción mundial de azúcar para ese año.²⁸ De entre los países desarrollados, se espera que Estados Unidos

²⁸ OECD/FAO. Azúcar...

sea el que incrementa en mayor proporción su producción, debido principalmente a su política proteccionista caracterizada por los apoyos a la producción interna, así como por el establecimiento de barreras arancelarias y no arancelarias.

3.1.2. Rendimientos

En lo referente a los rendimientos, durante las últimas seis décadas, Perú se ha mantenido a la cabeza, aunque su productividad se haya reducido en 19.0% en los últimos 30 años. Por otro lado, varios países africanos ahora tienen los mayores rendimientos del mundo, pero sus superficies son limitadas, por lo que no son potencias aún. De hecho, África tiene a 8 de los 10 países con rendimientos más altos durante el año 2021. Por ejemplo, Senegal, Malawi, Zambia y Burkina Faso tienen productividades superiores a las 100 toneladas por hectárea. Durante este periodo, 34 países incrementaron su productividad en más de 100.0%; Chad pasó de 25 a 104, Honduras de 24 a 87 y Guatemala de 52 a 108 toneladas por hectárea.

México pasó del lugar 36 al 25; no obstante, sus rendimientos están 40.0% por debajo de los países más productivos. En 60 años estos el país incrementó su productividad sólo en 35.2%; es decir 0.6% anualmente, por lo que corre el riesgo de ser desplazado de los primeros lugares, en los próximos años. Existen varios factores que han permitido que algunos países avancen más que otros en lo que a rendimientos se refiere; entre ellos están la investigación y la inversión interna (pública y privada). Los países del África subsahariana, han logrado incrementar sus superficies aprovechando sus ventajas: sus condiciones agroecológicas, su ubicación geográfica y sus bajos costos de mano de obra.²⁹ En otros países como Guatemala, la intervención externa, ha constituido un factor determinante para su desarrollo.

3.1.3. Superficie

La superficie mundial cosechada se triplicó, al pasar de 8.9 a 26.8 millones de hectáreas; es decir, 3.4% más cada año. En 1961, de los noventa países produjeron caña, sólo tres concentraron más de la mitad de la superficie cañera: India (27%), Brasil (15%) y Cuba (14%).

Esta tendencia a la concentración se ha acentuado aún más en las últimas décadas y para el presente año, con un número similar de países produciendo, cinco naciones

²⁹ T. M. Hess; J. Sumberg; T. Biggs; M. Georgescu; D. Haro-Monteagudo; G. Jewitt; M. Ozdogan; M. Marshall; P. Thenkabail; A. Daccache; F. Marin y J.W. Knox. "A sweet deal? Sugarcane, water and agricultural transformation in Sub-Saharan Africa". *Global Environmental Change* 39: (2016): 181-194. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.003>.

cuentan con 73.0% de la superficie, de los cuales Brasil (38%) y la India (19%), tienen la mitad del total (Figura 3).

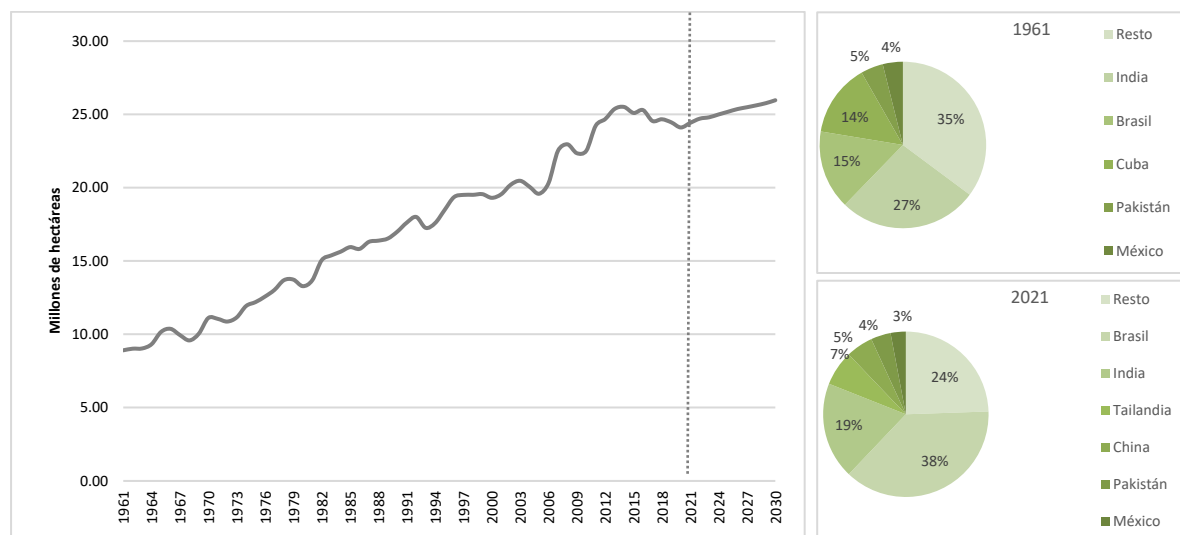


Figura 3. Superficie mundial cosechada con caña de azúcar.

Fuente: Elaboración propia con datos de FAO, 2021.

En términos proporcionales, México perdió una posición al pasar de contar con el 4% al 3% de la superficie cañera mundial. De hecho, el país ha incrementado sus áreas cañeras a más del doble en 60 años; sin embargo, otros países han experimentado incrementos mucho mayores.

3.2. Demanda

Para la economía mundial del azúcar, el factor económico fundamental es el consumo, el cual durante las últimas tres décadas pasó de 47.8 a 173.5 millones de toneladas; un incremento de 270.0% (8.5% anual). Actualmente, los países en desarrollo producen y consumen 70.0% del azúcar, y se prevé que continuarán siendo la fuente principal de crecimiento en el consumo en los próximos años.

El consumo per cápita de azúcar ha experimentado un incremento promedio anual de 4.4%. En 1990 cada habitante del planeta consumía en promedio 9.2 kilogramos de azúcar por año; mientras que para 2021, ingiere 22.1. Se espera que para 2030, el consumo global crezca otro 11.4% y el per cápita 3.7%. Para ese año entonces, el mundo consumirá 196 millones de toneladas de azúcar, aproximadamente 23 kilogramos por individuo (Figura 4).

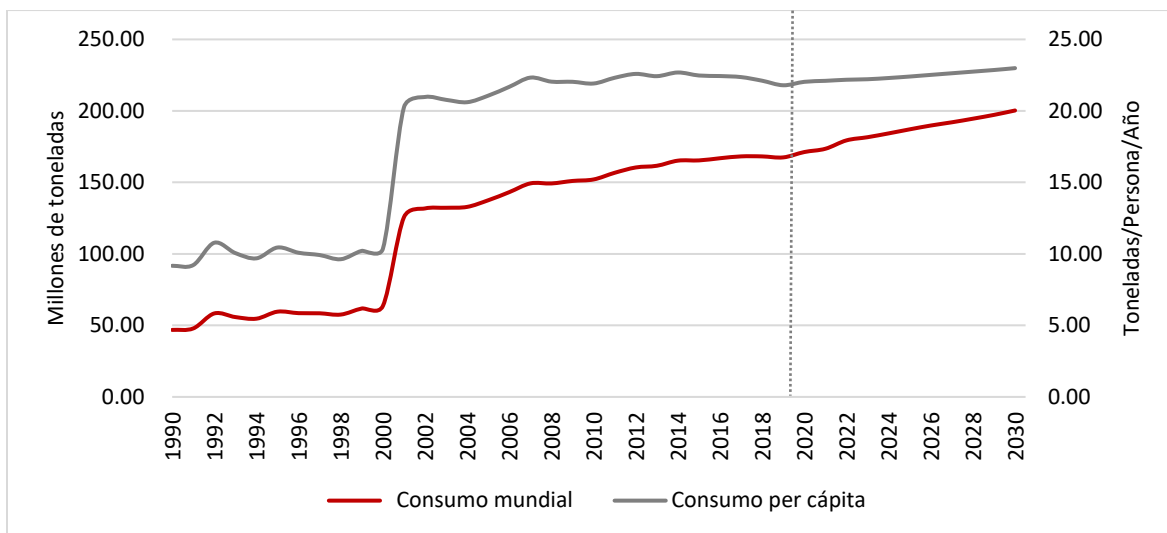


Figura 4. Consumo mundial de azúcar.
Fuente: Elaboración propia con datos de OCDE/FAO, 2021.

Sin embargo, este incremento experimentará profundas variaciones entre regiones y países. En general, se prevé que, en las economías de ingresos altos se reduzca el consumo, y el incremento se dé principalmente en los países más pobres; es decir que, a mayor ingreso, habrá menor incremento en el consumo. Los continentes con mayor crecimiento serán Asia con 66.0% (principalmente en India) y África con 33% (principalmente en Egipto).

El consumo en los países desarrollados ha sido desalentado por la creciente preocupación de los efectos negativos del consumo excesivo de azúcar, tales como la diabetes, las enfermedades cardíacas y la caries,³⁰ sobre todo en Australia, Nueva Zelanda, Canadá y los países de Europa Occidental.

En América Latina, en donde las personas ya tienen altos niveles de consumo, se prevé un crecimiento discreto de 4.0%. Un caso excepcional en las tendencias de consumo es México, que aun siendo un país en vías de desarrollo ha visto reducida su ingesta de azúcar en los últimos años, debido al impuesto a los productos azucarados calóricos, establecido por el gobierno en 2014, con la intención de reducir los índices de sobrepeso y obesidad prevalentes en el país.

No obstante, a 6 años de esta medida, y pese a la reducción en la ingesta de azúcar, no se han observado resultados favorables para la población mexicana, pues mientras que

³⁰ Robert H. Lustig; Laura A. y Clare D. Schmidt. Brindis. "The toxic truth about sugar". Nature 482 (2012): 27–29. <https://doi.org/10.1038/482027a>.

en ese año el país ocupaba el segundo lugar en obesidad y el cuarto en obesidad infantil, para 2020 el país escaló al primer lugar en obesidad infantil.³¹

3.3. Precios

En la historia contemporánea (posterior a 1960) de la caña de azúcar y su principal producto comercial, el azúcar; la oferta ha mostrado grandes variaciones provenientes de la manipulación de los productores más fuertes, pero también por los conflictos internos y externos de las naciones potencia. Además, los fenómenos climatológicos también han jugado un papel determinante en las recurrentes expansiones y contracciones de la oferta.

Esto ha repercutido en constantes altibajos en los precios del azúcar. En 60 años el precio real apenas se duplicó al pasar de 176 a 396 dólares por tonelada, mostrando años con precios tan bajos como 44 dólares por tonelada entre los años 1965 y 1968, y de 88 dólares por tonelada en 1985. Por otro lado, ha habido años con precios récord, como 1974 cuando se alcanzó el azúcar costaba 639 dólares por tonelada, al igual que en 2011 cuando se pagaron 595 dólares por tonelada, en el mercado internacional. El incremento promedio anual fue de 9.4%; es decir 3.8 dólares por tonelada por año. Las expectativas, en base al panorama y las tendencias actuales, es que los precios se mantengan a su nivel actual en lo que resta de la década; de hecho, se espera un ligero retroceso de 1.0% para el 2030 (Figura 5).

³¹ OECD (Organization for Economic Cooperation and Development). "The Heavy Burden of Obesity: The Economics of Prevention" en OECD Health Policy Studies (París: OECD Publishing, 2019). <https://doi.org/10.1787/67450d67-en>.

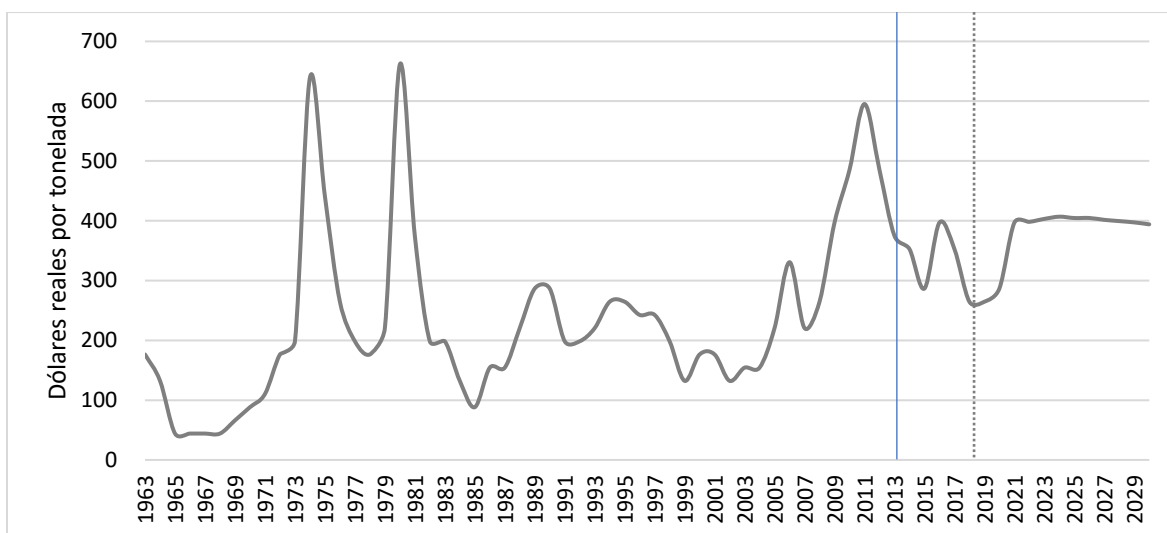


Figura 5. Precios reales del azúcar en el mercado internacional³².
Fuente: Elaboración propia con datos de Macrotrends³³ y OCDE/FAO³⁴, 2021.

3.4. Comercio

En lo referente al comercio mundial del azúcar, las exportaciones se incrementaron en 358.0%, al pasar de 5.2 a 23.9 millones de toneladas; es decir, 406 mil toneladas más cada año. Se espera que para 2030, haya un incremento adicional de 15.0% para culminar exportando 27.8 millones de toneladas. Al inicio del periodo varios exportadores europeos eran realmente intermediarios, mientras que Cuba era el principal exportador mundial. Para 2021 el panorama es completamente distinto, Tailandia e India se han convertido en los principales vendedores con 30% del azúcar que se comercializa en el mundo, y una expectativa de mayor concentración de las exportaciones en los próximos años. Las importaciones también han mostrado un incremento sostenido (408.0%). En 1961 se reportó la compra de 4.4 millones de toneladas de azúcar, mientras que en 2021 las ventas cerrarán en 22.5 millones. Lo anterior implica que cada año se han importado unas 373 mil toneladas más que el año anterior (Figura 6).

³² Para calcular los precios reales se utilizaron los datos de los precios del azúcar blanca de MACROTRENDS en 2021 y OECD/FAO en 2021, y se tomó como año base 1974.

³³ Macrotrends. Sugar Prices - 37 Year Historical Chart. 2021. <https://www.macrotrends.net/2537/sugar-prices-historical-chart-data> (consultada el 28 de septiembre de 2021).

³⁴ OECD/FAO. Azúcar...

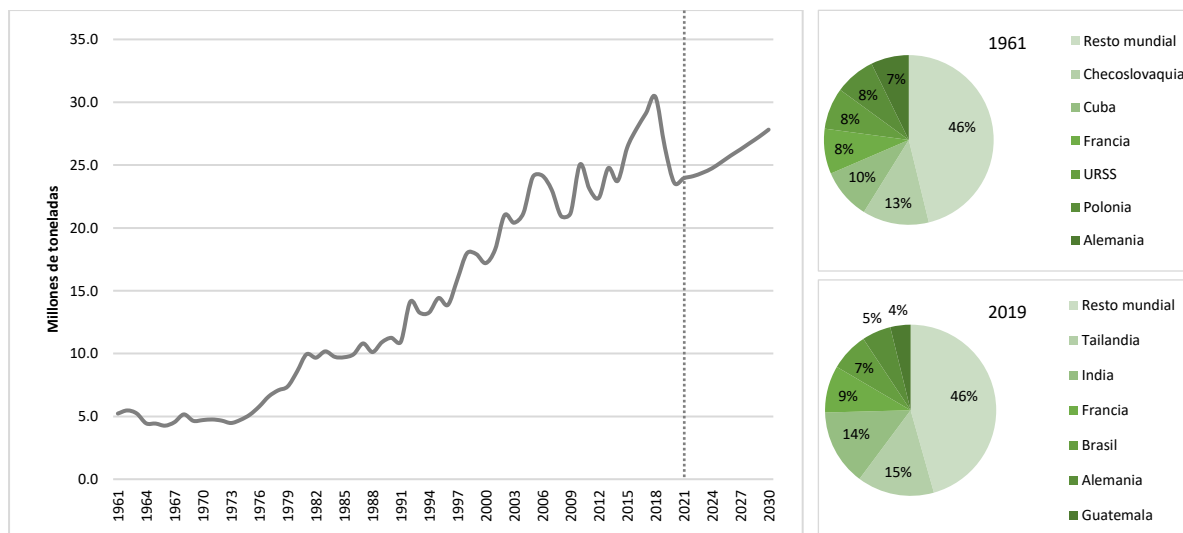


Figura 6. Exportaciones mundiales de azúcar refinada.
Fuente: Elaboración propia con datos de FAO, 2021.

Las importaciones están mucho menos concentradas que las exportaciones y su tendencia es a la dispersión. En 1961, los cinco principales importadores, compraron 30.0% del azúcar del mundo, mientras que en 2021 sólo el 20.0%. La expectativa de mayor crecimiento se encuentra en los países en vías de desarrollo de Asia y África, donde la explosión demográfica es alta y el ingreso ha crecido, pero no lo suficiente para considerarlos desarrollados (Figura 7).

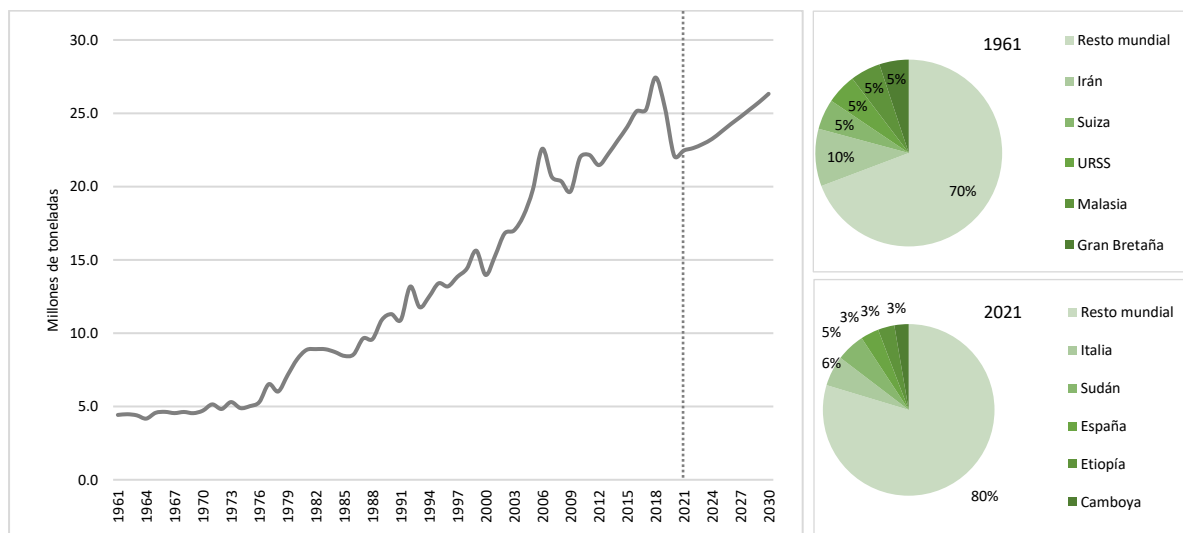


Figura 7. Importaciones mundiales de azúcar refinada.
Fuente: Elaboración propia con datos de FAO, 2021.

4. FACTORES INTERNOS

4.1. Producto

Como alimento, históricamente el azúcar ha cumplido con dos funciones básicas: endulzar alimentos para mejorar sus cualidades gustativas, y proveer de energía. La cultura gastronómica de México incluye el consumo de azúcar de manera directa o a través de diversos productos preparados: dulces, postres, panes, conservas, guisados, bebidas de hierbas, flores, frutas y preparados, entre otros. Además, es un conservador de alimentos (como en las frutas cristalizadas), de fermentación para uso ganadero (como el Sachapulido para los bovinos) y favorece la congelación de ciertos productos como los helados.³⁵ También tiene usos en la industria cosmética para la elaboración de jabones transparentes. En el terreno de la medicina, los laboratorios utilizan el azúcar en el cultivo de la penicilina.³⁶

En México la caña de azúcar se sigue utilizando casi en su totalidad para producir azúcar de diferentes calidades. Lo anterior hace que la rentabilidad de la agroindustria dependa de los precios del azúcar, y éstos de las condiciones de oferta y demanda internas, así como de los precios internacionales.

4.2. Oferta

La cadena de valor de la caña de azúcar en México se ha mantenido prácticamente intacta por siglos. Es tradicionalmente corta, debido a que su principal producto, el azúcar, se comercializa como un commodity³⁷. La mayor parte de la producción se destina al consumo interno, tanto final como intermedio.

Aunado a lo anterior, aunque la cadena de valor tenga pocos eslabones, son los agentes intermedios y finales los que se quedan con la mayor proporción del precio final del producto, y no los productores que; en todo caso, son los que enfrentan los mayores costos y riesgos en la producción (Figura 8).

³⁵ E. Ibañez Aranda. "Alimento fermentado a base de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en el cambio de peso de bovinos en pastoreo". *Agroproductividad* 9: 7 (2016): 56-61.

³⁶ Leonard Mertens. *Hacia el trabajo decente...* 2008.

³⁷ Un commodity es un producto no diferenciado, sin valor agregado que se comercializa a granel, no envasado y sin marcas (Cambridge, 2021).

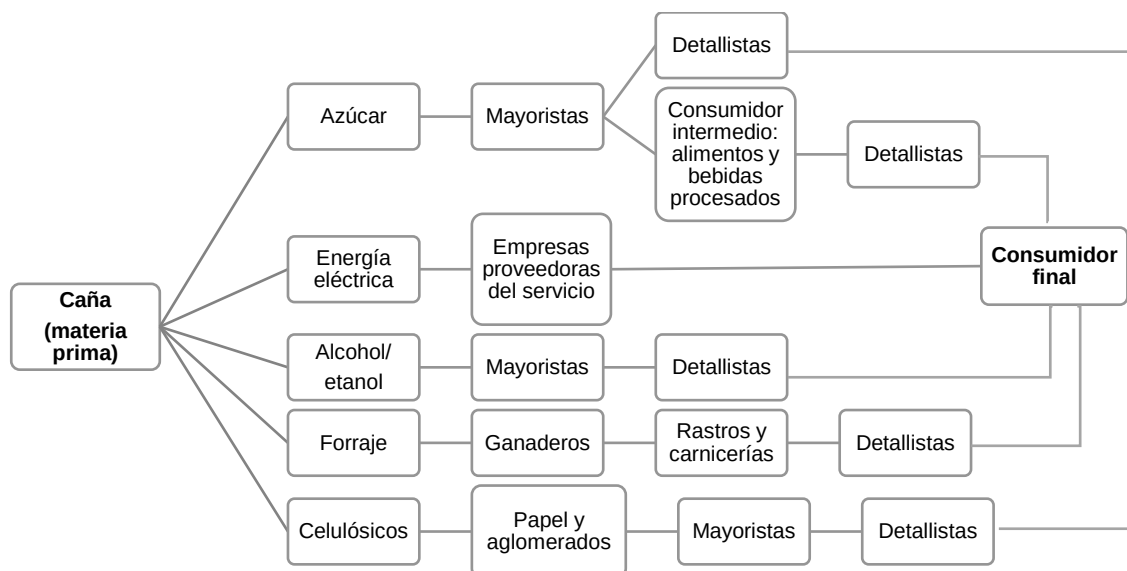


Figura 8. Esquema de la cadena de valor tradicional de la caña de azúcar en México.

Fuente: Elaboración propia con información de Mertens, 2021.³⁸

4.3. Demanda

En el mundo, la demanda de caña de azúcar, que tradicionalmente se reducía a su uso alimenticio como azúcar, ha tomado un nuevo rumbo que le ha exigido a los productores modificaciones en el volumen y características de su producción.

Actualmente se aprovecha una gran cantidad de productos derivados de la caña de azúcar, como bagazo, sacarosa, melaza, etanol, vinaza y cachaza, entre otros.³⁹ Sin embargo, su producción y uso aún no se han desarrollado en todo su potencial. Para el caso de México, el azúcar que, durante siglos fue prácticamente el único endulzante, experimentó un cambio derivado de dos sucesos principales: el primero, de carácter mundial, fue la modificación de las fórmulas de los productos de la empresa Coca Cola en 1982, lo cual constituyó el antecedente para que el resto de las industrias de las bebidas y los alimentos procesados, modificaran sus fórmulas e incluyeran sustitutos de azúcar en ellas.⁴⁰

Para 2009, México era el principal consumidor de bebidas azucaradas del mundo con un consumo de 163 litros por persona. Para entonces, el país ya ocupaba los primeros lugares en obesidad de adultos e infantil, lo que implica un alto riesgo en las

³⁸ Leonard Mertens. Hacia el trabajo decente en el sector del azúcar, México. Documento de trabajo núm. 259 (Ginebra: Oficina Internacional del Trabajo, 2008), 83.

³⁹ Noe Aguilar Rivera. Diversificación productiva de la...53–66.

⁴⁰ Winton. The Sweet and Sour...

enfermedades asociadas a esta condición.⁴¹ Bajo estas premisas se decretó la Ley Especial sobre Producción y Servicios, el 11 de diciembre de 2013. Esta ley, que entró en vigor en enero del siguiente año, constituyó un segundo golpe para la agroindustria del azúcar en México, ya que implementó un impuesto especial (IEPS) a las bebidas azucaradas de \$1 por litro; que equivalía aproximadamente a 10.0% de su valor.⁴² Esta medida, ha ayudado a reducir el consumo de azúcar, pero aún no cumple con su objetivo principal, ya que los índices actuales de obesidad son iguales o peores que hace 7 años.

Además, los consumidores mexicanos han mostrado cambios sustanciales en sus patrones de consumo, sobre todo en las últimas cuatro décadas, derivados de las modificaciones en su estilo de vida y su nivel de ingresos. Actualmente existe una tendencia a consumir productos más sanos, entre los que están los reducidos en calorías. Esta tendencia ha sido acentuada por las campañas publicitarias encaminadas a fomentar el uso de sustitutos de azúcar, obteniendo como resultado una reducción de 26.0% en el consumo per cápita de azúcar en 20 años y se espera otra disminución de 7.8% para 2030 (Figura 9).

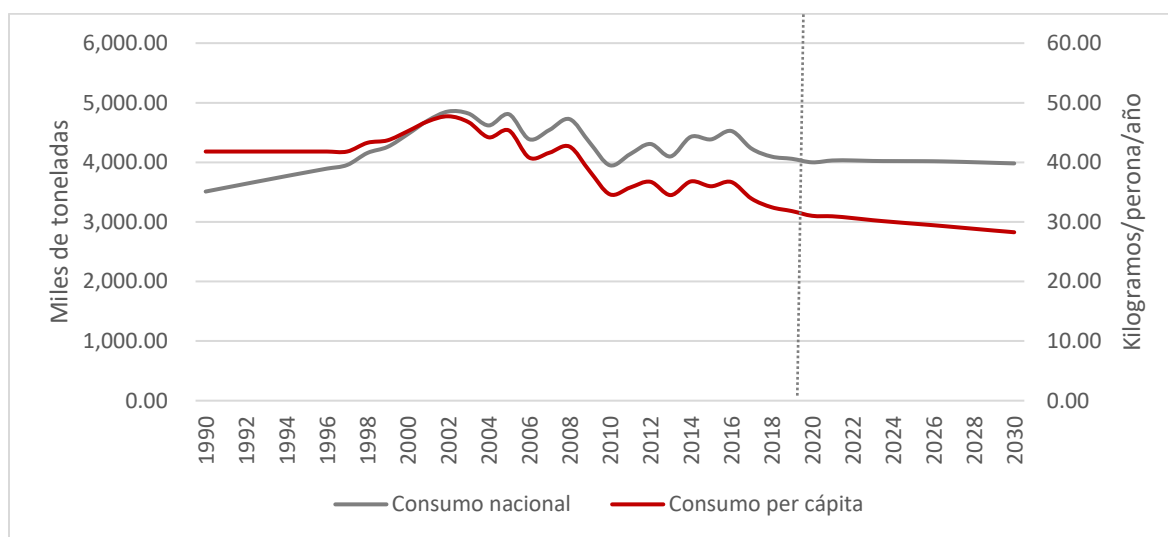


Figura 9. Consumo de azúcar en México.
Fuente: Elaboración propia con datos de OCDE/FAO, 2021.

⁴¹ Ariela Braverman Bronstein; Dalia Camacho García Formentí; Rodrigo Zepeda Tello; Frederick Cudhea; Gitanjali M. Singh; Dariush Mozaffarian y Tonatiuh Barrientos Gutiérrez. "Mortality attributable to sugar sweetened beverages consumption in Mexico: an update". *International Journal of Obesity* 44 (2020): 1341–1349. <https://doi.org/10.1038/s41366-019-0506-x>.

⁴² LEIPS (Ley del Impuesto Especial sobre Producción y Servicios). Poder Ejecutivo. 2013. SHCP (Secretaría de Hacienda y Crédito Público).

No obstante, la demanda nacional ha crecido en 14.9% en los últimos 30 años debido al crecimiento poblacional y la distribución de la riqueza en nuestro país, ya que como se mencionó, hay una relación inversa entre el nivel de ingreso y el consumo de azúcar. En efecto, en los últimos 120 años, el ingreso nacional se incrementó a un ritmo de 3.6% anual, en términos reales.^{43 44} Actualmente, México es la economía número 15 del mundo por el volumen nominal de su Producto Interno Bruto (PIB).⁴⁵

Sin embargo, 59% de los mexicanos apenas cuentan con un ingreso de 2,548 pesos al mes⁴⁶, debido a la enorme brecha en el nivel de ingresos que existe entre los pobres y los ricos. Para 2020, 44% de la población vivía en condiciones de pobreza y 8.5% en pobreza extrema.⁴⁷

4.4. Cambio en los patrones de consumo

Aunque la mitad de los mexicanos continúen en situación de pobreza, necesariamente el incremento en su nivel de ingresos ha implicado modificaciones en su dieta, agregando mayores cantidades de carnes y alimentos procesados ricos en grasas, azúcares y harinas. Además, del incremento poblacional de 6.6% anual que el país ha experimentado en el último siglo, se ha presentado una inversión entre las proporciones de la población rural y urbana; ya que para 1910 tres cuartas partes de la población vivían en el medio rural, y para 2021 esa misma proporción habita el medio urbano.⁴⁸ El estilo de vida de los ambientes rurales demandaba un mayor esfuerzo físico para la realización de las actividades que el actual estilo de vida ciudadano.

El consecuente desequilibrio ocasionado por la ingesta de dietas intensivas en carbohidratos, proteínas, grasas y azúcares, acompañadas de un estilo de vida sedentario, ha generado altos índices de obesidad y riesgos de enfermedades crónicas,

⁴³ WD (The World Bank). GDP (constant 2015 US\$) - Mexico. 2021. <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD?locations=MX> (consultada el 28 de septiembre de 2021).

⁴⁴ Angus Maddison. The World Economy: Historical Statistics, Development Centre Studies (París: OECD Publishing, 2003), 274. <https://doi.org/10.1787/9789264104143-en>.

⁴⁵ IMF (International Monetary Fund). Report for Selected Countries and Subjects: October 2021. 2021. <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/weodatabase/2021/October/> (consultada el 3 de noviembre de 2021).

⁴⁶ CEEY (Centro de Estudios Espinosa Yglesias A. C). Bienestar con equidad: hacia un nuevo pacto social (Ciudad de México: CEEY Editorial, 2020), 11.

⁴⁷ CONEVAL (Consejo Nacional de Evaluación para la Política de Desarrollo Social). Medición de la pobreza. 2021. <https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/Pobrezalicio.aspx> (consultada el 10 de noviembre de 2021).

⁴⁸ INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). Censos y Conteos de Población y Vivienda. 2021. <https://inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/> (consultada el 27 de octubre de 2021).

como diabetes, hipertensión y síndrome metabólico.⁴⁹ Es por ello, que un segmento de los consumidores está optando por edulcorantes bajos en calorías como parte de su dieta, sustituyendo azúcar. Si se agregan las medidas tomadas por el gobierno para desalentar el consumo de alimentos altos en calorías, y todo el movimiento de concientización sobre los beneficios de llevar una vida saludable, se tiene como consecuencia una drástica reducción del consumo de azúcar.

Finalmente, las grandes empresas han visto incrementar sus ganancias con la venta de toda clase de productos y servicios que no solo promueven un estilo de vida saludable, sino que han exacerbado toda una cultura de “adoración al físico”.

Actualmente, los gimnasios y toda clase de disciplinas deportivas, los aparatos para ejercitarse en casa, los implementos para cocinar comida saludable, los establecimientos con comida “gluten free”, “low carb”, orgánicos, vegetarianos, veganos (y todas sus variantes), forman parte de la cultura de consumo.⁵⁰ No obstante, esta tendencia no ha sido uniforme para toda la población, ya que al ser productos radicalmente más costosos que los “tradicionales”, no son accesibles para un gran sector de los mexicanos.

Por ejemplo, el azúcar de caña sigue siendo más barato que sus sustitutos vegetales o sintéticos, por lo que continúa siendo preferido por las familias de menores ingresos. El xilitol, un derivado de la madera de abedul se vende a un precio superior a los \$400/kg en tiendas en línea. Lo mismo ocurre con el azúcar de coco orgánica, que se comercializa en presentaciones de 300 gramos a un precio de \$63/envase (aprox. \$210/kg).

También existen opciones de sustitutos de azúcar mucho más económicas (generalmente sintéticos), como la sacarina, la sucralosa o el aspartame; pero siguen siendo mucho más costosas que el azúcar, que en su calidad estándar se comercializó a un precio al consumidor de \$28/kg en mercados y supermercados, durante el mes de octubre de 2021.⁵¹

Si se considera que un operario de la zona industrial de San Luis Potosí gana un sueldo promedio de \$193 diarios,⁵² éste tendría que utilizar más de un día de su sueldo para comprar un kilogramo de sustituto de azúcar. Son entonces, los estratos de la población con mejores ingresos los que, habiendo cubierto sus necesidades básicas, pueden

⁴⁹ Rajib Dasgupta; Rakesh Pillai; Rakesh Kumar y Narendra K. Arora. Sugar, Salt, Fat, and Chronic Disease Epidemic in India: Is There Need for Policy Interventions?. *Indian Journal of Community Medicine* 40: 2 (2015): 71-74. <https://doi.org/10.4103/0970-0218.153858>.

⁵⁰ WHO (World Health Organization). 2015. Beyond bias: exploring the cultural contexts of health and well-being measurement. First meeting of the expert group en “Cultural Contexts of Health and Well-being, No.1”, Copenhagen, Denmark, 15–16 January 2015.

⁵¹ PROFECO (Procuraduría Federal del Consumidor). ¿Quién es quién en los precios? 2021. <https://www.profeco.gob.mx/precios/canasta/home.aspx?th=1> (consultada el 29 de octubre de 2021).

⁵² INDEED. ¿Cuál es el salario de un/a Operario/a de producción en San Luis Potosí? 2021. <https://mx.indeed.com/career/operario-produccion/salaries/San-Luis-Potosi> (consultada el 25 de noviembre de 2021).

preocuparse por la calidad de los alimentos que consumen; es por ello, que además son reacios al consumo de sustitutos químicos, debido al temor de sus efectos secundarios, y optan por los sustitutos de origen vegetal que, como ya se comentó, son los de mayor precio.

Aunado a lo anterior, y dado que generalmente los edulcorantes no ofrecen un sabor idéntico al azúcar, muchas personas siguen prefiriendo el tradicional sabor de ésta, pese a sus ya bien conocidos efectos. En lo referente al consumidor intermedio, el que tradicionalmente utilizaba el azúcar como un insumo para elaborar otros productos, también ha mostrado modificaciones substanciales en sus patrones de consumo a través de los años.

El surgimiento del jarabe de maíz de alta fructuosa (JMAF), con características similares en su composición (fructosa/glucosa) al azúcar, ofrece la ventaja de ser más dulce, estable y limpio. Sin embargo, fue su bajo costo el que determinó que le ganara la batalla al azúcar por la preferencia de los industriales de las bebidas azucaradas.⁵³ El cambio en el estilo de vida de la población ha traído diversas afectaciones, como el incremento en casos de personas con alergias a diversas sustancias químicas. Por esta razón, actualmente existe un mercado creciente de productos orgánicos, que ha implicado modificaciones en los sistemas productivos.

El surgimiento de la demanda de productos que tradicionalmente no existían, como los combustibles menos contaminantes y más económicos, también han propiciado cambios en la forma de producir. Aunque este sigue siendo un mercado incipiente en México, la tendencia mundial está enfocada en este tipo de energías, como medio de diversificación de la producción de la caña de azúcar. De la mano de la conciencia ecológica viene la conciencia social. Actualmente los consumidores prefieren productos de empresas socialmente responsables, los cuales cuentan con un distintivo que, en México es otorgado por el Centro Mexicano para la Filantropía (CEMEFI), a empresas y organizaciones que cumplen con una serie de criterios de rentabilidad y sustentabilidad económica, social y ambiental.⁵⁴

4.5. Competencia por el uso de los recursos con otros cultivos

Si bien, la caña de azúcar es uno de los principales cultivos del país tanto por superficie cosechada como por producción y valor de la misma, hay otros cultivos que han ganado competitividad en los últimos años y, que de alguna manera pueden volver menos atractivo el cultivo de la caña.

⁵³ Winton. The Sweet and Sour...

⁵⁴ CEMEFI (Centro Mexicano para la Filantropía). Todo sobre el distintivo ESR. 2021. <https://www.cemefi.org/esr/> (consultada el 2 de diciembre de 2021).

Para 2020, la caña de azúcar, el quinto cultivo con mayor superficie cosechada en el país ocupó 850 mil hectáreas para su producción. No obstante, el aguacate con menos de una tercera parte de extensión, generó un valor 16.0% mayor. No obstante, los competidores directos actualmente son los cultivos establecidos en condiciones agroclimáticas similares a la caña como algunos frutales (cítricos y mango), el café y los pastos inducidos para uso pecuario. Todos estos cultivos se encuentran entre los principales 15 productos agrícolas nacionales, y algunos cuentan con buen potencial para su desarrollo futuro.⁵⁵

La competencia por el uso del suelo entre la caña de azúcar y otras actividades cuenta con particularidades en cada zona de producción. Por ejemplo, en el estado de San Luis Potosí, la zona cañera coincide con sitios ecoturísticos y existe una constante lucha por los recursos existentes, particularmente el suelo y el agua.

4.6. Envejecimiento y obsolescencia en el sistema productivo e industrial

La agroindustria cañera mexicana usó las variedades generadas y seleccionadas por el IMPA (Instituto para el Mejoramiento de la Producción de Azúcar) durante 40 años. Sin embargo, esta institución desapareció por decreto presidencial en 1990 y la investigación y el desarrollo tecnológico del cultivo perdieron ritmo, hasta llegar a ser prácticamente nulos en muchas zonas productoras del país.⁵⁶

Actualmente, la producción se sustenta en cuatro genotipos: CP 72-2086 (36%), Mex 69-290 (29%) y Mex 79-431 (9%), que en su conjunto se ocupan tres cuartas partes de la superficie cañera del país. Otros 8 genotipos se distribuyen en 20% del territorio.⁵⁷ Como se puede observar, los dos principales genotipos fueron creados hace 50 años o más, cuando las condiciones bióticas y abióticas de la producción eran diferentes a las actuales; por esta razón, estas variedades no están adaptadas al cambio y variabilidad climáticos que se han acentuado en recientes años, así como al ataque de nuevas plagas y enfermedades, entre otros factores.

Además, un gran porcentaje de las plantaciones están envejecidas, lo que además de ser un indicador del manejo inadecuado del cultivo, también incide directamente en los rendimientos, los cuales son decrecientes a través del tiempo.

A nivel nacional, 81.2% de los cultivos se encuentran en fase de resoca (con dos o más cortes), 8.4% en soca (con un corte) y sólo 10.5% en plantilla (plantaciones nuevas). La

⁵⁵ SIAP (Sistema de Información Agrícola y Pesquera). SIACON NG (Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta). 2021 (descargada el 11 de noviembre de 2021).

⁵⁶ CONADESUCA (Consejo Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar). Nuevas variedades de caña de azúcar. Nota informativa sobre innovaciones en materia de productividad del sector. 2016.

⁵⁷ CONADESUCA (Consejo Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar). Variedades con mejores rendimientos de las zonas cañeras en México. Nota Técnica Informativa. 2016.

recomendación técnica es que las plantaciones tengan una vida útil de 5 años, pero se han encontrado casos en el país con plantaciones de más de 15 años de establecidas. Aunado a ello, al producirse en condiciones heterogéneas en las diferentes zonas cañeras del país, hay grandes variaciones en la composición de las plantaciones. Por ejemplo, la región noroeste tiene mucho mayor superficie en fase de plantilla (15.8%) que la región Córdoba-Golfo (4.0%) (Figura 10).

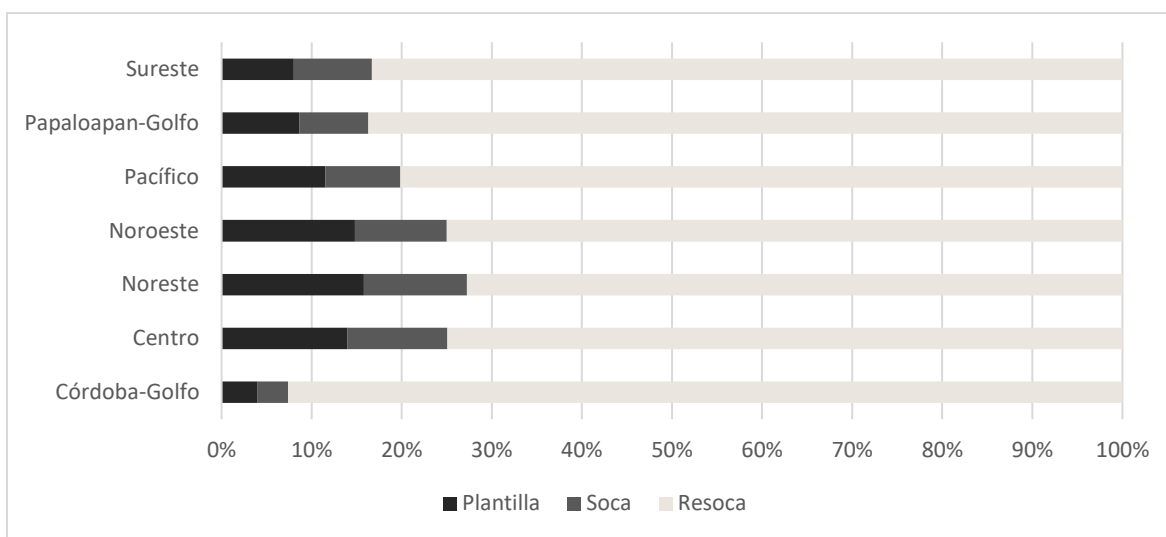


Figura 10. Fase de las plantaciones de caña de azúcar por región cañera en México.
Fuente: Elaboración propia con datos de CONADESUCA, 2021.

En lo que a estados se refiere, es sin duda Tamaulipas el que muestra plantaciones más jóvenes (30.4% en fase de plantilla), y son precisamente los dos ingenios de este estado (El Mante con 33.5% y Aarón Sáenz Garza con 27.3%), los que en conjunto con el Ingenio Emiliano Zapata (24.4%) de Morelos, presentan las plantaciones más jóvenes.

4.7. Impacto ambiental

Otro factor que pone en riesgo la sustentabilidad de esta agroindustria es su impacto ambiental. El cambio de uso de suelo masivo para convertir áreas naturales en zonas cañeras, ha significado la pérdida del del hábitat de muchas especies causando un daño ambiental significativo, en particular por pérdida de biodiversidad.

Los suelos erosionados y los compuestos contenidos en los agroquímicos aplicados a menudo contaminan los suministros de agua. El procesamiento de la caña de azúcar también genera desechos que fluyen al agua y dañan áreas ecológicas importantes. Además, debido a que estos suelos se lixivian fácilmente, la producción solo se puede mantener a lo largo del tiempo con aplicaciones cada vez mayores de fertilizantes.

Asimismo, los ingenios azucareros producen aguas residuales y desechos sólidos que impactan el ambiente. Las cantidades masivas de materia vegetal y lodos que se lavan de los molinos, se descomponen en cuerpos de agua dulce, absorbiendo el oxígeno disponible y provocando la muerte masiva de varias especies.⁵⁸

Por otra parte, durante la producción e industrialización de la caña de azúcar se emite una importante cantidad de diversos contaminantes del aire, como monóxido y dióxido de carbono (CO y CO₂), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos no metánicos (NMHC), metano (CH₄), anhídrido sulfoso, ácido carbónico, hidrocarburos y partículas PM₁₀ y PM_{2.5}, así como el carbono negro (CN) contenido en estas últimas.⁵⁹

Estas emisiones se producen en un primer momento, en la producción, ya que la cosecha en muchos casos implica una doble quema; la primera se produce antes de realizar el corte para facilitar la cosecha, abaratar costos y eliminar fauna peligrosa para los cortadores; y la segunda, posterior al corte, para eliminar residuos y plagas con el objetivo de incrementar la productividad de los terrenos.⁶⁰

Después, durante el proceso agroindustrial, los ingenios utilizan el bagazo de caña para generar energía con su combustión, además de usar derivados del petróleo para realizar sus procesos, cuando el bagazo no es suficiente.

En México la caña de azúcar aún se cosecha por el método de quema en casi 90% de los casos; este porcentaje ha permanecido prácticamente inalterado durante las últimas 14 zafras, con una reducción de apenas 2.4%.

Los estados en los que más se cosechó por el método de quema para la zafra 2020-2021 fueron Chiapas, Puebla y Nayarit, con el total de su producción y los que menos quemaron fueron Tamaulipas y Campeche, con 52% y 63% respectivamente. Durante esta cosecha, las zonas de abasto de 10 de los 49 ingenios que operaron realizaron la quema del 100% de su cosecha y solamente 6 ingenios lo hicieron en menos del 70%. El Mante es el ingenio que menos quema (52%), aunque lo continúa haciendo en más de la mitad de su cosecha (Figura 11).⁶¹

⁵⁸ WWF (World Wildlife Fund. Sugarcane). 2021. <https://www.worldwildlife.org/industries/sugarcane> (consultada el 15 de noviembre de 2021).

⁵⁹ Jennifer S. Le Blond; Susan Woskie; Claire J. Horwell y Ben J. Williamson. "Particulate matter produced during commercial sugarcane harvesting and processing: A respiratory health hazard?". *Atmospheric Environment* 149 (2017): 34-46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.11.012>.

⁶⁰ Alemayehu Dengia y Egbert Lantinga. "Effect of Pre-Harvest Cane Burning on Human Health, Soil Quality and Rate of Cane Weight Loss in Ethiopian Sugarcane Plantations". *Advances in Crop Science and Technology* 6: 5 (2018): 396. <https://doi.org/10.4172/2329-8863.1000396>.

⁶¹ CONADESUCA (Consejo Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar). SINFOCAÑA (Sistema de información para generar reportes de producción). 2021. <https://www.gob.mx/conadesuca/acciones-y-programas/sistema-infocana> (consultada del 15 al 30 de noviembre de 2021).

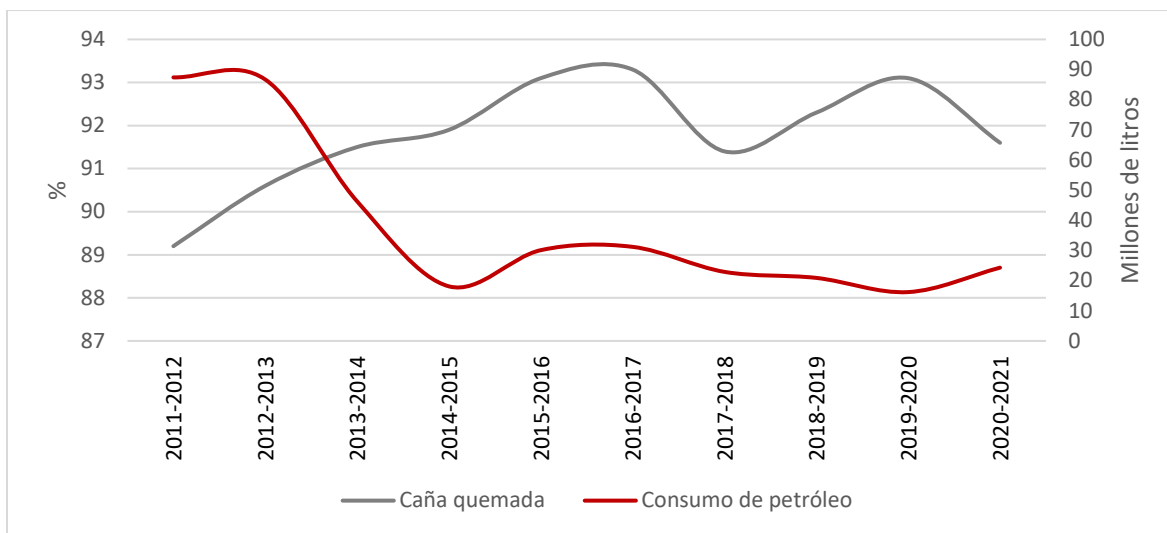


Figura 11. Indicadores de impacto ambiental en México por contaminación del aire.
Fuente: Elaboración propia con datos de CONADESUCA, 2021.

Por otro lado, el consumo de petróleo se ha reducido drásticamente y para la zafra 2020-2021 se utilizaron 24.3 millones de litros en los procesos de los ingenios, lo que implica una reducción de 72.0% con respecto a la cantidad que se utilizó durante la zafra 2011-2012. Aunque la mayoría de los ingenios declaró no utilizar derivados de petróleo para ninguno de sus procesos, otros como Plan de San Luis de San Luis Potosí, El Carmen y San Nicolás de Veracruz y Puga de Nayarit, reportaron consumos de 12.9, 6.8, 0.9 y 0.9 millones de litros de petróleo, respectivamente.⁶²

4.8. Precios internos del azúcar

Al igual que en el mercado internacional, el precio interno del azúcar no ha sido el principal incentivo para incrementar la producción de la caña de azúcar. En términos nominales, el precio del azúcar creció en más de 700.0% durante los últimos 20 años; sin embargo, al eliminar el efecto inflacionario, el crecimiento real ha sido tan solo de 22.5%; es decir, menos de 1% anual.

Por esta razón, la producción está pendiendo casi por completo de la demanda interna del azúcar, lo cual implica un alto riesgo para la actividad, pues como ya se vio, el consumo per cápita ha decrecido de forma drástica en los últimos 20 años y la expectativa es que se reduzca aún más (Figura 12).

⁶² CONADESUCA. SINFOCAÑA...2021.

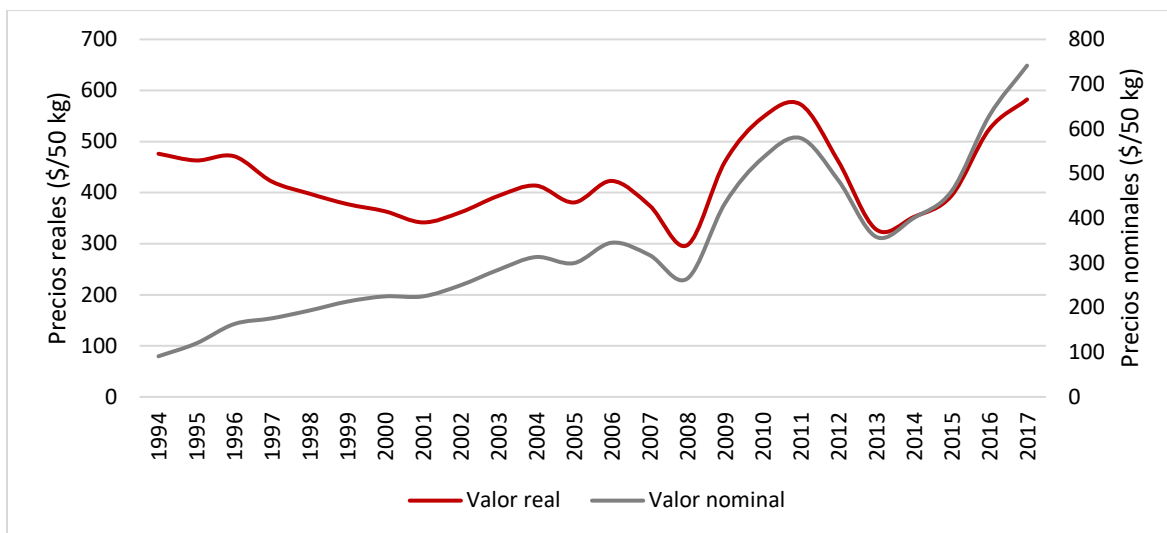


Figura 12. Precios del azúcar estándar en el mercado interno de México.⁶³

Fuente: Elaboración propia con datos de USDA, 2021.

4.9. Diversificación poco desarrollada

En México, se producen cinco derivados de la caña de azúcar; tres son bienes y dos son servicios. Además, también se obtienen subproductos como el bagazo, la cachaza y la vinaza. Los tres bienes son: azúcar, miel final de 85° Brix (melaza) y alcohol de 96°. Por otro lado, los dos servicios son: vapor y energía eléctrica.⁶⁴

A su vez, el azúcar se produce en cinco diferentes calidades: blanco especial, refinada, estándar, mascabado y con grado de polarización menor a 99.2°. Para la zafra 2020-2021 se produjeron 51.3 millones de toneladas de azúcar, 6.2% más que en la zafra 2007-2008. Aunque la producción ha mostrado variaciones considerables en el periodo, el incremento promedio anual fue de 0.4%.

El azúcar de calidad estándar representó 59.7% de la producción, el refinado 23.6%, el de Pol < 92.5° 12.9%, el blanco especial 3.2% y el mascabado 0.6%. La composición de la participación de las calidades producidas ha cambiado en las últimas 14 zafas; las calidades refinada y estándar redujeron su participación en 28.8% y 13.4%, respectivamente. Lo contrario sucedió con las calidades blanco especial y mascabado, que incrementaron su participación pero que siguen representando un porcentaje muy pequeño de la producción. CONADESUCA comenzó a registrar la calidad Pol < 92.5° a

⁶³ ERS (Economic Research Service). USDA (United States Department of Agriculture). Table 54--Bulk sugar prices in Mexico, estándar (standard) sugar. 2021. <https://www.ers.usda.gov/webdocs/DataFiles/53304/Table54.xls?v=0> (descargada el 20 de octubre de 2021).

⁶⁴ CONADESUCA. SINFOCAÑA...2021.

partir de la zafra 2017-2018 con participaciones aproximadas a 13% del total cada año, a partir de ese periodo.

En mucha menor magnitud se produce la melaza o miel final de 85° Brix, para la producción de alcohol de 96° pero, sobre todo, como suplemento alimenticio de uso pecuario. Para 2020-2021 se obtuvieron 2 millones de toneladas de melaza en México, 9.1% más que 14 años atrás. En lo referente al alcohol de 96°, el país produjo 15.3 millones de litros, lo que representó una reducción de 20% con respecto a 2007-2008, cuando se produjeron 19.4 millones de litros.

Finalmente, la generación de energía que ofrece la agroindustria se ha incrementado en los últimos años; en el caso de la generación de vapor, durante la zafra 2020-2021 se produjeron 27.5 millones de toneladas, lo que representa un incremento de 11.8% en los últimos 14 años. De igual forma, se generaron 1.1 billones de kilowatts de energía eléctrica, 41.3% más que hace 10 años, pese a que el consumo de esta energía por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), se redujo en 17.8%.

5. CONCLUSIONES

Desde su domesticación, la caña de azúcar comenzó a cobrar importancia al ser la principal fuente de producción de azúcar. Este producto de relevancia nutrimental y económica en todo el mundo, alcanzó popularidad mundial después de que fuera el ingrediente principal de muchos platillos en las cortes medievales. La masificación de la producción permitió que su precio llegara a niveles que la hicieran asequible para la población en general. No obstante, el poco control que durante varios siglos tuvieron los gobiernos sobre la oferta del azúcar, propició constantes variaciones de la oferta y con ello de los precios del producto, lo que terminó por desalentar su demanda y hacer que los consumidores buscaran sustitutos.

A pesar de ello, durante el último siglo el consumo ha repuntado y se ha podido sostener por la explosión demográfica registrada en varios países en vías de desarrollo, particularmente de África y Asia, quienes son los principales consumidores de azúcar y lo continuarán siendo en las próximas décadas. Aunque los incrementos en la oferta han sido auspiciados parcialmente por los avances científicos y tecnológicos, que han permitido duplicar los rendimientos en algunos países, la mayor parte de la producción ha crecido gracias a la incorporación de tierras para la producción de caña. Por lo tanto, el incremento de la producción ha implicado deforestación masiva, sobre todo en los grandes países productores como Brasil o India. Así que no se puede decir que, a nivel mundial, hay una lógica de producción con enfoque de sostenibilidad, aún en nuestros días.

Además, el mundo ha experimentado una presencia continua de excedentes de azúcar debido a que la velocidad de crecimiento del consumo ha sido menor que la de la producción. Es por esta razón que los precios mundiales no se han desplomado, ya que existe una expectativa de un ajuste mundial de equilibrio del mercado.

Actualmente, la tendencia de la producción se ha enfocado en la diversificación, aunque hasta el momento pocos de los países tomado acciones para dicho fin. Si bien, la oferta de la caña de azúcar ha estado determinada por factores naturales y humanos de diversa índole, las variaciones de la demanda del azúcar se pueden explicar principalmente por los precios y sus abruptos cambios. Sin embargo, en los últimos 50 años, las características del producto también han jugado un papel determinante en su consumo, ya que existe una tendencia a sustituir su uso por el de endulzantes con bajos en calorías. Ambos factores se han conjuntado para que el consumo per cápita del azúcar se reduzca de manera sustancial.

Esto sin embargo, sólo ha ocurrido en los países con ingresos altos o los que, como México, han desalentado el consumo de azúcar a través de leyes. Por otro lado, en la mayor parte de los países en vías de desarrollo, el consumo se ha incrementado y la expectativa es a que crezca aún más.

Para el caso de México, la situación de la agroindustria de la caña de azúcar, ha sido agravada por sus problemas sociales internos y en mayor medida, por las políticas agrícolas adoptadas por los diferentes gobiernos, a través de los años. Particularmente, el abandono del sector después de la revolución verde, que ha provocado que se pierda competitividad en el entorno internacional, derivado de un crecimiento a un ritmo mucho menor que el de otros países.

Además de los cambios en los patrones de consumo, el suceso que ha tenido una mayor repercusión en la ingesta per cápita de azúcar de los mexicanos, ha sido la ley del impuesto a las bebidas calóricas, establecido en 2014.

No obstante que se ha logrado reducir el consumo per cápita de azúcar, los índices de sobrepeso y obesidad se han mantenido; lo cual indica que, si realmente se quiere incidir en una mejora en la salud de los mexicanos, se requiere de un plan mucho más integral y estructurado que incluya el fomento del deporte desde temprana edad y el consumo saludable, más que la simple reducción en la ingesta de algunos productos.

El consumo nacional de azúcar se ha podido mantener gracias al incremento poblacional, pero se ha ralentizado en los últimos años y se tiene una expectativa de decrecimiento para el final de la década, por lo que es un momento determinante para replantear la agroindustria cañera nacional antes de que su situación actual se agrave hasta un punto sin retorno. El cierre de casi 20.0% de los ingenios en los últimos 20 años es sólo un indicador de la situación de crisis que vive la caña de azúcar mexicana; pero también lo son las variedades con más de 50 años que están diseminadas en tres cuartas partes del territorio nacional.

De igual forma, las plantaciones están envejecidas: más de 80.0% se encuentra en fase de resoca (con 2 o más cortes) y solo 10.5% son plantaciones nuevas. La producción de la mitad del territorio nacional depende de las lluvias. La cosecha por el método de quema se sigue practicando en casi 90.0% de los casos, y aunque los ingenios redujeron en 72.0% el uso del petróleo en sus procesos, aún se utilizan 24.3 millones de litros de este combustible, por año.

Se considera que esta actividad debería de continuar siendo una prioridad nacional, al constituir el sustento de 13 millones de personas que habitan 267 municipios cañeros en 15 entidades del país. Además de los 182 mil productores de caña, 54 mil obreros de fábrica, 154 mil jornaleros y 70 mil cortadores dependen de la producción e industrialización de la caña de azúcar.

Se considera que el desarrollo futuro de la actividad se debería de enfocar en la diversificación de la producción y el desarrollo basado en el incremento de rendimientos y la reducción de pérdidas. Para tal fin, se deberían fomentar aspectos fundamentales como el control integrado de plagas y enfermedades, el uso racional del agua y la creación de variedades nuevas, así como un sistema de monitoreo y vigilancia que reduzcan los riesgos en la producción. Como eje transversal para que estos fines puedan alcanzarse, tendría que existir una fuerte inversión, pública y/o privada, enlazada a un plan nacional integral que además contemple la legislación en cuestiones ambientales.

6. BIBLIOGRAFÍA

Aguilar Rivera, Noe. "Diversificación productiva de la industria azucarera ¿Reto tecnológico, económico o social?". *Mundo siglo XXI* 18 (2009): 53–66.

Aguilar Rivera, Noe. "La caña de azúcar y sus derivados en la huasteca San Luis Potosí, México". *Diálogos Revista Electrónica de Historia* 11:1 (2010): 81-110. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1409-469X2010000100003&lng=en&tlng=es.

Aguilar Rivera, Noé; Guadalupe Galindo Mendoza; Javier Fortanelli Martínez y Carlos Contreras Servín. "Factores de competitividad de la agroindustria de la caña de azúcar en México". *Región y Sociedad* XIII: 52 (2011). 261-697. <http://dx.doi.org/10.22198/rys.2011.52.a188>.

Aguilar Rivera, Noe; Marcos Algara Siller y Luis Alberto Olvera Vargas. "Gestión del agua como factor limitante de productividad cañera en México". *Revista de Geografía Norte Grande* 60 (2015): 135-142. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022015000100008>.

Ballinger, Roy A. *A History of Sugar Marketing Through 1974*. U. S. Department of agriculture / Economics, statistics, and cooperatives service agricultural economic report no. 382. 1978. <https://www.ers.usda.gov/publications/pub-details/?pubid=40540>.

Braverman Bronstein, Ariela; Dalia Camacho García Formentí; Rodrigo Zepeda Tello; Frederick Cudhea; Gitanjali M. Singh; Dariush Mozaffarian y Tonatiuh Barrientos Gutiérrez. "Mortality attributable to sugar sweetened beverages consumption in Mexico: an update". *International Journal of Obesity* 44 (2020): 1341–1349. <https://doi.org/10.1038/s41366-019-0506-x>.

CEFP (Centro de Estudios de las Finanzas Públicas de la Cámara de Diputados). *La agroindustria azucarera en México*. México, D. F. 2001. <https://www.cefp.gob.mx/intr/edocumentos/pdf/cefp/cefp0392001.pdf>.

CEEY (Centro de Estudios Espinosa Yglesias A. C). *Bienestar con equidad: hacia un nuevo pacto social*. Ciudad de México: CEEY Editorial. 2020.

CEMEFI (Centro Mexicano para la Filantropía). Todo sobre el distintivo ESR. 2021. <https://www.cemefi.org/esr/> (consultada el 2 de diciembre de 2021).

CISE (Sistema de Información Sobre Comercio Exterior). Canadá-Estados Unidos-México (TLCAN/NAFTA). http://www.sice.oas.org/tpd/nafta/nafta_s.asp (consultada el 16 de septiembre de 2021).

CONADESUCA (Consejo Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar). Nuevas variedades de caña de azúcar. Nota informativa sobre innovaciones en materia de productividad del sector. 2016.

CONADESUCA (Consejo Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar). Variedades con mejores rendimientos de las zonas cañeras en México. Nota Técnica Informativa. 2016.

CONADESUCA (Consejo Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar). SINFOCAÑA (Sistema de información para generar reportes de producción). 2021. <https://www.gob.mx/conadesuca/acciones-y-programas/sistema-infocana> (consultada del 15 al 30 de noviembre de 2021).

CONEVAL (Consejo Nacional de Evaluación para la Política de Desarrollo Social). Medición de la pobreza. 2021. <https://www.coneval.org.mx/Medicion/Paginas/PobrezalInicio.aspx> (consultada el 10 de noviembre de 2021).

Dabat, Christine Rufino. "El Azúcar en América Latina y el Caribe. Cambio tecnológico, trabajo, mercado mundial y economía azucarera. Perspectiva histórica y problemas actuales", editado por Horacio Crespo. Ciudad de México: Senado de la República. Las Américas 68: 2 (2006): 283-285. <https://doi.org/10.1017/S0003161500001036>.

Dasgupta, Rajib; Rakesh Pillai; Rakesh Kumar y Narendra K. Arora. Sugar, Salt, Fat, and Chronic Disease Epidemic in India: Is There Need for Policy Interventions?. Indian Journal of Community Medicine 40: 2 (2015): 71-74. <https://doi.org/10.4103/0970-0218.153858>.

Dengia, Alemayehu y Egbert Lantinga. "Effect of Pre-Harvest Cane Burning on Human Health, Soil Quality and Rate of Cane Weight Loss in Ethiopian Sugarcane Plantations". Advances in Crop Science and Technology 6: 5 (2018): 396. <https://doi.org/10.4172/2329-8863.1000396>.

Derrick, Jonathan. "The Great West African Drought, 1972-1974." African Affairs 76, no. 305 (1977): 537-86. <http://www.jstor.org/stable/721780>.

ERS (Economic Research Service). USDA (United States Department of Agriculture). Table 54--Bulk sugar prices in Mexico, estándar (standard) sugar. 2021. <https://www.ers.usda.gov/webdocs/DataFiles/53304/Table54.xls?v=0> (descargada el 20 de octubre de 2021).

Figueroa Rodríguez, Katia Angélica; Ana María Teresa García García; Yesica Mayett Moreno; Francisco Hernández Rosas y Benjamín Figueroa Sandoval. "Factores que explican el rendimiento de caña de azúcar a nivel municipal en México". Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 6: 6 (2015): 1345-1358. <https://doi.org/10.29312/remexca.v6i6.581>.

Hernández Ayón, Hermilio y Francisco Javier Hernández Ayón. "La caña de azúcar en su contexto histórico" en El sector cañero de Nayarit desde una perspectiva organizacional y ambiental,

editado por Fundación Universitaria Andaluza Inca Garcilaso. 2013. 4-33. <http://www.eumed.net/libros-gratis/2013a/1333/index.htm>.

Hess, T.M.; J. Sumberg; T. Biggs; M. Georgescu; D. Haro-Monteagudo; G. Jewitt; M. Ozdogan; M. Marshall; P. Thenkabail; A. Daccache; F. Marin y J.W. Knox. "A sweet deal? Sugarcane, water and agricultural transformation in Sub-Saharan Africa". *Global Environmental Change* 39: (2016): 181-194. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.003>.

Ibañez Aranda, E. "Alimento fermentado a base de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en el cambio de peso de bovinos en pastoreo". *Agroproductividad* 9: 7 (2016): 56-61.

INDEED. ¿Cuál es el salario de un/a Operario/a de producción en San Luis Potosí? 2021. <https://mx.indeed.com/career/operario-producci%C3%B3n/salaries/San-Luis-Potos%C3%AD> (consultada el 25 de noviembre de 2021).

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). Censos y Conteos de Población y Vivienda. 2021. <https://inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/> (consultada el 27 de octubre de 2021).

IMF (International Monetary Fund). Report for Selected Countries and Subjects: October 2021. 2021. <https://www.imf.org/en/Publications/WEO/weodatabase/2021/October/> (consultada el 3 de noviembre de 2021).

Le Blond, Jennifer S.; Susan Woskie; Claire J. Horwell y Ben J. Williamson. "Particulate matter produced during commercial sugarcane harvesting and processing: A respiratory health hazard?". *Atmospheric Environment* 149 (2017): 34-46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.11.012>.

Josipović, Igor y Marko Vujeva. "Economic Aspects of Slavery in the Triangular Trade in the Early Modern Period." *Journal of Gazi Academic View* 14:28 (2021): 179–97.

LEIPS (Ley del Impuesto Especial sobre Producción y Servicios). Poder Ejecutivo. 2013. SHCP (Secretaría de Hacienda y Crédito Público).

Lustig, Robert H.; Laura A. y Clare D. Schmidt. Brindis. "The toxic truth about sugar". *Nature* 482 (2012): 27–29. <https://doi.org/10.1038/482027a>.

Macrotrends. Sugar Prices - 37 Year Historical Chart. 2021. <https://www.macrotrends.net/2537/sugar-prices-historical-chart-data> (consultada el 28 de septiembre de 2021).

Maddison, Angus. *The World Economy: Historical Statistics*, Development Centre Studies. París: OECD Publishing. 2003. <https://doi.org/10.1787/9789264104143-en>.

Mertens, Leonard. *Hacia el trabajo decente en el sector del azúcar, México*. Documento de trabajo núm. 259. Ginebra: Oficina Internacional del Trabajo. 2008.

Ochoa Neira, Miguel Gerardo; Marcos Reyes García y José Antonio Manríquez Núñez. *Producción Sostenible de Caña de Azúcar en México*. FIRA Boletín Informativo, editado por Liliana Ruede Alcocer. SEPRIM Servicios Profesionales en Impresión. 2010.

OECD (Organization for Economic Cooperation and Development). "The Heavy Burden of Obesity: The Economics of Prevention" en *OECD Health Policy Studies*. París: OECD Publishing. 2019. <https://doi.org/10.1787/67450d67-en>.

OECD/FAO (Organization for Economic Cooperation and Development/Food and Agriculture Organization). "Azúcar" en OECD-FAO Agricultural Outlook 2021-2030. París: OECD Publishing. 2021. 167-180. <https://doi.org/10.1787/3463d2a1-es>.

OIT (Organización Internacional del Trabajo). Trabajo decente. 2021. <http://www.oit.org/global/topics/decent-work/lang-es/index.htm> (consultada el 15 de septiembre de 2021).

Philpott, Tom. The Secret History of Why Soda Companies Switched From Sugar to High-Fructose Corn Syrup. <https://www.motherjones.com/food/2019/07/>.

Pollitt, Brian H. "The Cuban Sugar Economy and the Great Depression." *Bulletin of Latin American Research* 3:2 (1984): 3–28. <https://doi.org/10.2307/3338249>.

Ponce López, Ernesto. "La Remolacha y Napoleón". *Idesia (Arica)* 29:2 (2011): 151-156. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292011000200020>.

PROFECO (Procuraduría Federal del Consumidor). ¿Quién es quién en los precios? 2021. <https://www.profeco.gob.mx/precios/canasta/home.aspx?th=1> (consultada el 29 de octubre de 2021).

Radell, Willard W. "Cuban-Soviet Sugar Trade, 1960-1976: How Great Was the Subsidy?" *The Journal of Developing Areas* 17:3 (1983): 365–82. <http://www.jstor.org/stable/4191149>.

Sánchez Romero, Luz María; Francisco Canto Osorio; Romina González Morales; M Arantxa Colchero; Shu Wen Ng; Paula Ramírez Palacios; Jorge Salmerón y Tonatíuh Barrientos Gutiérrez. "Association between tax on sugar sweetened beverages and soft drink consumption in adults in Mexico: open cohort longitudinal analysis of Health Workers Cohort Study". *BMJ* 369 (2020):m1311. doi:10.1136/bmj.m1311.

Sánchez Santiró, Ernest. "Evolución productiva de la agroindustria azucarera de Morelos durante el siglo XIX: una propuesta de periodización". *América Latina en la historia económica* 26 (2006): 109-127. <https://doi.org/10.18232/alhe.v13i2.382>.

Santamaría García, Antonio. "Un país De Azúcar: Crecimiento Y Crisis De La economía Azucarera Cubana, De La Independencia a La Crisis De Los años Treinta". Op. Cit. *Revista Del Centro De Investigaciones Históricas* 15 (2018): 191-244.

SIAP (Sistema de Información Agrícola y Pesquera). SIACON (Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta). 2021 (descargada el 11 de noviembre de 2021).

Singels, Abraham; Phillip Jackson y Geoff Inman-Bamber. "Chapter 21-Sugarcane". En "Crop Physiology Case Histories for Major Crops". Editado por Victor O. Sadras y Daniel F. Calderini. Academic Press. 2021. 674-713.

Tello, Carlos. "Estancamiento económico, desigualdad y pobreza 1982-2009". *ECONOMÍAUnam* 7: 19 (2010): 5-44. <https://doi.org/10.22201/fe.24488143e.2010.019.173>.

Thiébaud, Virginie y Luis Alberto Montero García. "Cañaverales, trapiches e ingenios en México. Dinámicas históricas y procesos actuales". *Ulúa* 23 (2014): 11-19. <https://doi.org/10.25009/urhsc.v1i23.1186>.

Thiébaud, Virginie y Luis A. Montero García. “Los actores del azúcar: cortadores, cañeros, obreros y grupos empresariales, siglos XIX-XXI”. *Ulua* 29 (2017): 11-19. <https://doi.org/10.25009/urhsc.v0i29.2548>.

Torres Úlloa, Margarita; Ricardo G. Acosta Reyes, Bernardo G. Juárez Olascoaga. “El desempeño de la industria azucarera en México y su competitividad”. *Eseconomía* 16 (2007): 33-59. <http://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/15246>.

Toussaint, Eric. “Capítulo 10. El banco mundial y la crisis de la deuda del tercer mundo”. En *La bolsa o la vida. Las finanzas contra los pueblos*. Buenos Aires: CLACSO, Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales. 148-155.

WD (The World Bank). GDP (constant 2015 US\$) - Mexico. 2021. <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.KD?locations=MX> (consultada el 28 de septiembre de 2021).

WHO (World Health Organization). 2015. Beyond bias: exploring the cultural contexts of health and well-being measurement. First meeting of the expert group en “Cultural Contexts of Health and Well-being, No.1”, Copenhagen, Denmark, 15–16 January 2015.

Winton. The Sweet and Sour History of Sugar Prices. A recent report described a commodity trader buying up thousands of swimming pools’ worth of sugar, potentially moving the market. 2017. <https://www.winton.com/longer-view/the-sweet-and-sour-history-of-sugar-prices> (consultada el 2 de septiembre de 2021).

WWF (World Wildlife Fund. Sugarcane). 2021. <https://www.worldwildlife.org/industries/sugarcane> (consultada el 15 de noviembre de 2021).

II. SITUACIÓN Y CONTRASTES REGIONALES DEL SECTOR CAÑERO AZUCARERO MEXICANO Y SU IMPACTO AMBIENTAL: EL CASO DEL CARBONO NEGRO

SITUATION AND REGIONAL CONTRASTS OF THE MEXICAN SUGARCANE SECTOR AND ITS ENVIRONMENTAL IMPACT: THE CASE OF BLACK CARBON

RESUMEN

El sector cañero azucarero goza de gran arraigo e importancia social y económica en México. Sin embargo, desde hace décadas se encuentra sumergido en una crisis multifactorial manifestada por el cierre de ingenios y pérdidas en su productividad de campo y agroindustrial. Adicionalmente, genera un alto impacto ambiental en suelo, aire, deforestación y emisiones atmosféricas. Aunado a la problemática nacional, cada una de sus regiones productoras tiene problemas particulares. El carbono negro es un contaminante del aire considerado el principal indicador de calidad del aire. Durante la COP21, México se comprometió a reducir sus emisiones de carbono negro en un 51% para el año 2030. Esta investigación se realiza con el objetivo de analizar la tendencia de las emisiones de carbono negro de cada región cañera del país, durante el periodo 2013-2021, y su relación con algunos parámetros productivos. Los resultados obtenidos mostraron que la expansión de la superficie cañera se ha desacelerado en los últimos años y el sector muestra retrocesos en su productividad. Asimismo, en el periodo sus emisiones de carbono negro se redujeron en 16.4%, tasa que resulta insuficiente para contribuir efectivamente al logro de las metas establecidas por el país.

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

ABSTRACT

The sugarcane sector is deeply rooted and enjoys great social and economic importance in Mexico. However, for decades it has been submerged in a multifactorial crisis manifested by the closure of sugar mills and losses in field and agroindustrial productivity. In addition, it generates a high environmental impact on soil, air, deforestation, and atmospheric emissions. In addition to the national problem, each of its producing regions has its particular problems. Black carbon is an air pollutant considered the main indicator of air quality. During COP21, Mexico committed to reducing its black carbon emissions by 51% by 2030. This research is carried out to analyze the trend of black carbon emissions in each sugarcane region of the country, during the period 2013-2021, and its relationship with some productive parameters. The results showed that the sugarcane area's expansion has slowed down in recent years and the sector shows setbacks in its productivity. Likewise, in the period, its black carbon emissions were reduced by 16.4%,

this rate is insufficient to contribute effectively to the achievement of the goals established by the country.

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

1. INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar es el quinto producto agrícola más importante de México por superficie cosechada, y el tercero por volumen y valor de la producción, compitiendo con cultivos tan importantes como el maíz o el aguacate (SIAP, 2021). Genera ingresos anuales por 47 mil millones de pesos y se cultiva en más de 800 mil hectáreas de 267 municipios y 15 entidades federativas. Además, los 49 ingenios que operaron durante la zafra 2021/22 fueron abastecidos por 170 mil productores y generaron 440 mil empleos directos y 2.2 millones de empleos indirectos (SADER, 2021).

A pesar de su importancia, el sector cañero azucarero atraviesa por una crisis multifactorial caracterizada por baja productividad, ingenios con tecnología obsoleta y producción de mala calidad. A esto, se añaden los altos costos y la escasa diversificación de la producción, lo que ha provocado el cierre paulatino de ingenios (Aguilar et al., 2015). No obstante, el sector ha logrado mantener su importancia 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 importante cantidad de contaminantes (Le Blond et al., 2017). Por ejemplo, las labores de cultivo son mecanizadas en 96% de los casos y 90% de la cosecha se realiza por el método de doble quema. Asimismo, los ingenios queman bagazo de caña y combustóleo, que utilizan como sus principales insumos energéticos. Adicionalmente, durante la temporada de zafra se incrementa el tráfico de vehículos pesados que transportan la caña de las parcelas a los ingenios y posteriormente, el azúcar a sus puntos de procesamiento o distribución. Por ejemplo, durante los meses que duró la zafra 2020/21, se movilizaron más de 9,000 de estos vehículos (CONADESUCA, 2022).

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 2018) 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 en 2015, durante la COP21, se comprometió a reducir 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), por lo que sus GEI deberían de estar decreciendo a una tasa de 1.3% y su BC a una tasa de 3%, anualmente.

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 (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), hidrofluorocarbono (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆), además del BC; por fuentes y sumideros, para los cuatro sectores de emisión definidas 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 saber la tendencia de las emisiones de los diferentes subsectores que integran a cada sector, por ejemplo, el de la producción e industrialización de la caña de azúcar, así como sus aportaciones y variaciones por las diferentes regiones cañeras del país.

Actualmente se realiza una investigación sobre la emisión e impactos del BC del sector cañero azucarero de México, por lo que se comenzó por la estimación del contaminante utilizando el método oficial (Factor de Emisiones), para posteriormente comparar los resultados con los obtenidos con otros métodos de estimación.

Como parte de la investigación se realiza este estudio en donde se estimó la evolución de las emisiones de BC provenientes del sector cañero azucarero entre 2013 y 2021, a nivel nacional y por cada región cañera del país, para determinar su contribución a la consecución de las metas establecidas, sus diferencias entre regiones y su relación con algunas variables productivas.

2. ENFOQUE METODOLÓGICO

2.1. Área de Estudio

El área de estudio es la zona cañera de México, conformada por 267 municipios en 15 entidades federativas (Figura 1).

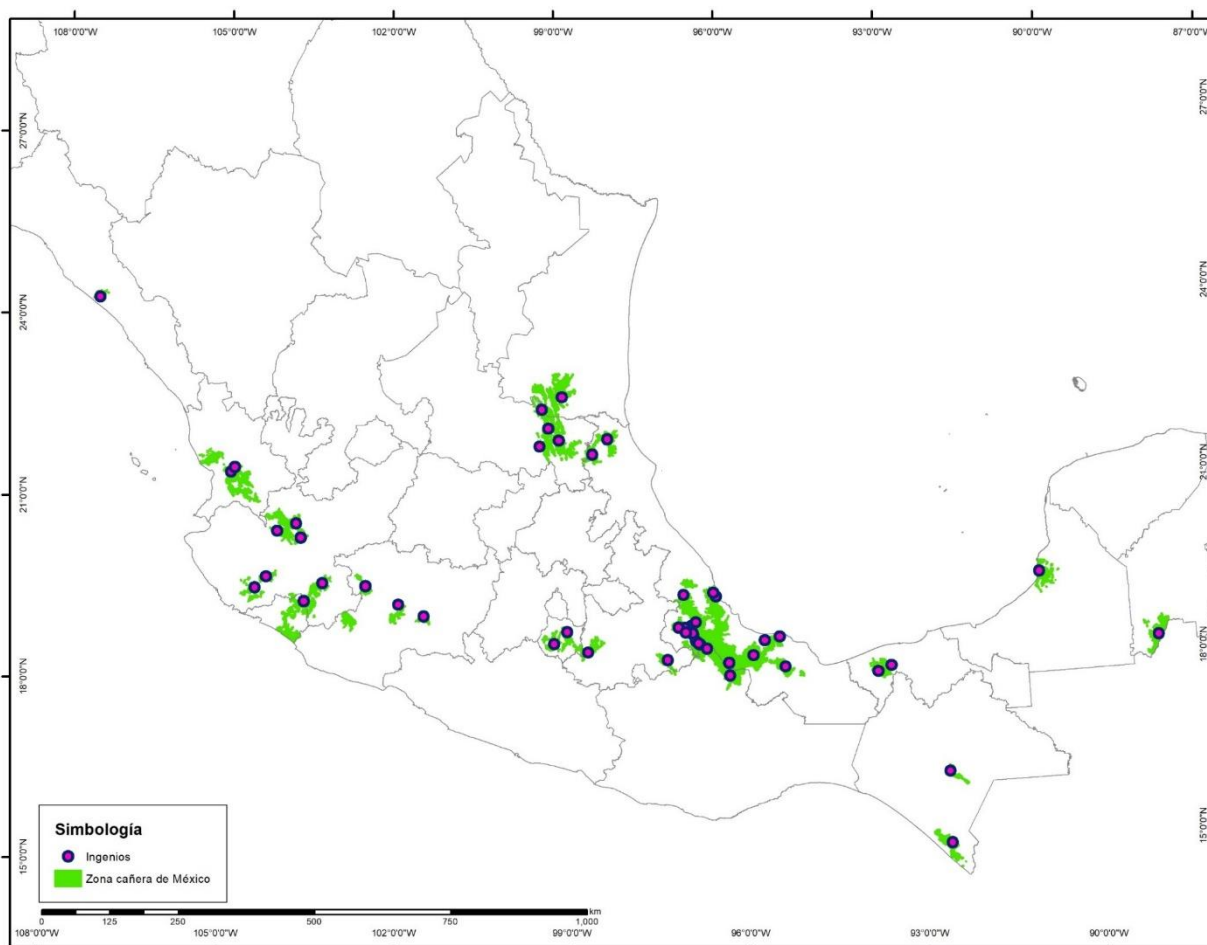


Figura 1. Ingenios azucareros y zonas de abasto en México.

2.2. Análisis por región

Para regionalizar la superficie cañera, se tomaron como base las regiones establecidas por CONADESUCA; se fusionaron las regiones Córdoba-Golfo y Papaloapan-Golfo, por su cercanía geográfica, creando una sola región denominada Golfo, resultando para el análisis, las siguientes seis regiones: Noreste, Golfo, Sureste, Centro, Pacífico y Noroeste.

Además de las variables indispensables para la estimación de emisiones de BC, como la cantidad de caña de azúcar cosechada, la proporción de caña que se cosecha por el método de quema, así como el bagazo y combustóleo utilizado por los ingenios; se utilizaron otras variables productivas adicionales como la superficie cosechada, el rendimiento en campo y el agroindustrial, así como la cantidad de azúcar producida, para analizar la evolución del sector durante el periodo y su relación con el impacto ambiental generado.

2.3. 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.

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

DA es la caña de azúcar producida, dada en toneladas de caña molida bruta por los ingenios que operaron durante las zafas 2012/13 a 2020/21. La información se recuperó de las bases de datos del Sistema de Información Sinfocaña (CONADESUCA, 2022). 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, 2016). Realizando el cálculo correspondiente, la proporción resultante es de 0.115992.

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

n son las mejoras en la eficiencia de los sistemas de producción, por lo que en este caso se valoró como 0, ya que no se cuenta con información concluyente sobre mejoras generalizadas en el sistema productivo 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 que 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 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).

DA es el bagazo de caña de azúcar utilizado por el ingenio durante la zafra, dado en toneladas (CONADESUCA, 2022).

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).

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

2.4. Representación espacial de las emisiones de BC

Se realizó la a representación de las emisiones durante la zafra 2020/21 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 8° Informe Estadístico del Sector Agroindustrial de la Caña de Azúcar en México (CONADESUCA, 2021). Para la obtención del padrón georreferenciado, con imágenes de alta resolución espacial (Sentinel-2), actualizado al año 2021, 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.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados

El sector cañero azucarero de México atraviesa por una crisis histórica, crónica y multifactorial (Solleiro et al., 2020). Un indicador de esta situación es el cierre paulatino de ingenios: durante los últimos 20 años, 10 de los 60 ingenios que existían dejaron de operar (CEFP, 2001) y tan sólo en la última década, en promedio se cerró un ingenio cada dos años.

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 en rendimientos obtenidos, por lo que, en algunos casos se analizó la variación promedio anual y no el cambio entre el inicio y el final del periodo. Por ejemplo, la superficie cultivada mostró un crecimiento promedio anual de 0.1%, con regiones con pujantes incrementos como la sureste, en donde Oaxaca creció a una tasa promedio de 5.7%, en contraste con otras como la Noreste, en donde Sinaloa decreció en promedio 11.1%, anualmente.

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 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).

Prácticamente en todos los estados productores el rendimiento en campo se redujo; a nivel nacional la productividad decreció en promedio 1.9% y la producción de caña 2.9%, cada año.

En lo referente al impacto ambiental, para el año 2021 el sector generó 22 mil toneladas de BC, 16.4% menos que en 2013. Sin embargo, es importante considerar que 2013 fue uno de los años del periodo con mayor producción de caña de azúcar (32.9% más alto que el año anterior y 11.6% más alto que el año siguiente). Así que, en este caso, la variación promedio anual de -2% también constituyó un indicador más real de lo que sucedió en el sector durante este periodo (Figura 2). De lo anterior se puede concluir que al menos dos terceras partes de la variación en las emisiones de BC, se debe a cambios en la cantidad producida de caña.

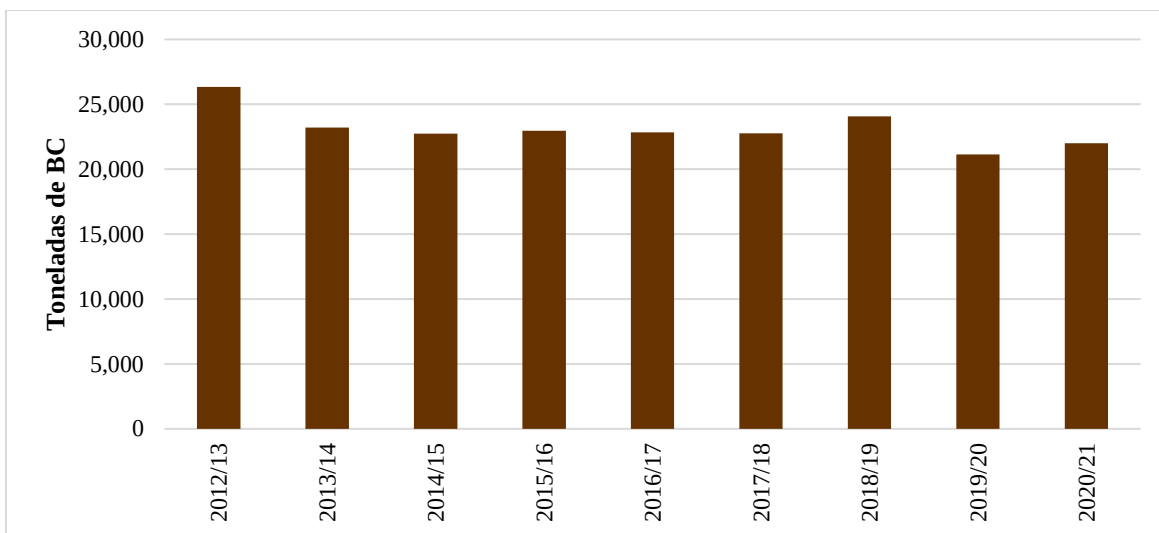


Figura 2. Emisiones de BC por el sector cañero azucarero de México.

El impacto ambiental 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). Por ejemplo, predomina la cosecha por el método de quema y aunque durante el periodo esta práctica se redujo a una tasa promedio anual de 0.6%, para el año 2021, casi 90% de la producción aún se cosecha por este método (Figura 3).

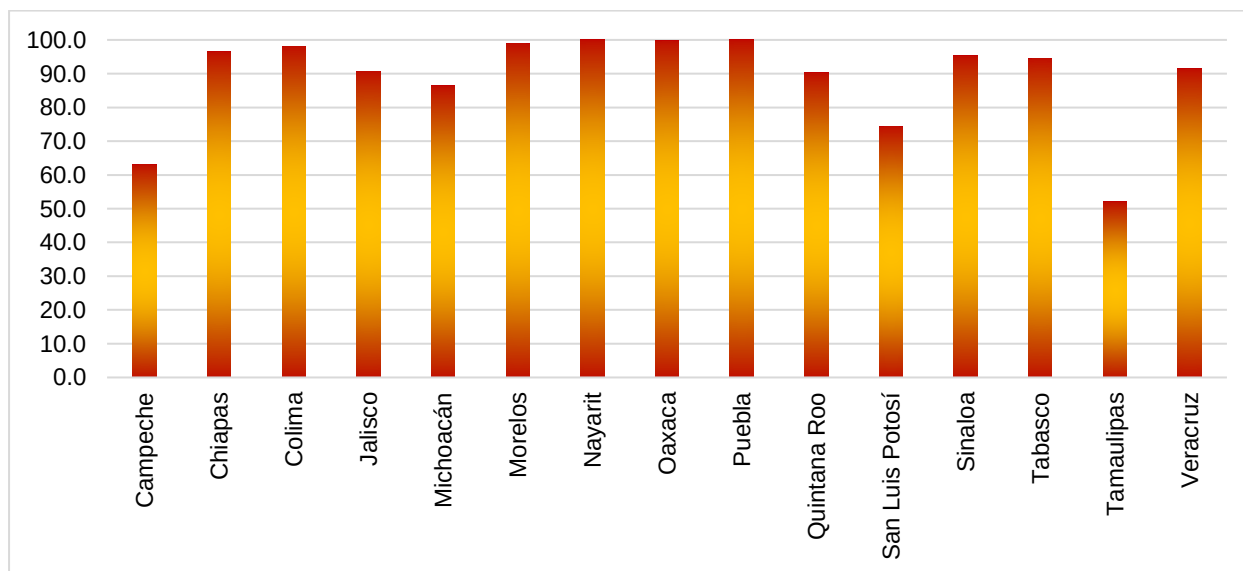


Figura 3. Porcentaje de la producción cosechada por el método de quema durante la zafra 2020/21, por estado.

La reducción en el uso de petróleo en los procesos industriales no ha impactado de forma significativa en las emisiones de BC ya que la principal fuente de contaminación es el bagazo utilizado por los propios ingenios, que causa 90% de las emisiones, seguido por la quema de caña de azúcar durante la cosecha (Figura 4).

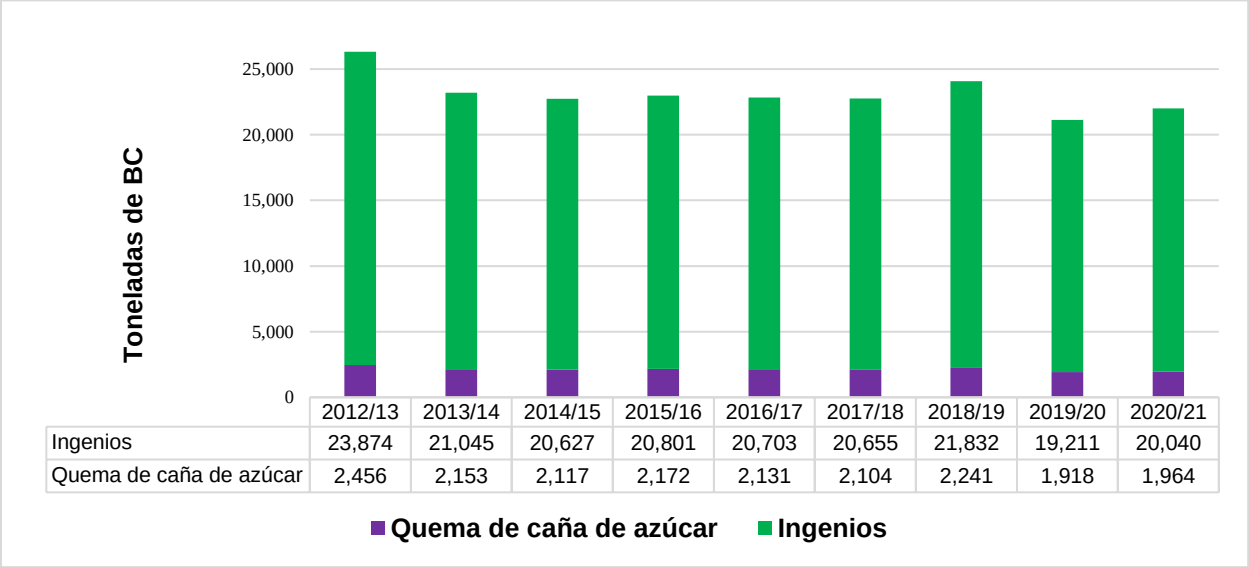


Figura 4. Emisiones de BC del sector cañero azucarero de México proveniente de la quema de caña de azúcar y de los ingenios.

No obstante, estas tendencias no han seguido el mismo sentido ni han sido uniformes en la superficie cañera nacional si no que han mostrado enormes diferencias que se han convertido en contrastes, tanto desde el punto de vista productivo como ambiental. A continuación, se mostrarán las principales condiciones y tendencias que han caracterizado cada región cañera durante este periodo.

3.1.1. Región Noreste

Con 174 mil 243 hectáreas cosechadas durante la zafra 2020/21 y 7 ingenios, es la segunda región más extensa del país y produce una quinta parte del azúcar nacional. Durante la zafra 2020/21 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.

Durante el periodo la superficie industrializada creció 8.1% pero los rendimientos sufrieron una importante caída; en campo la productividad se redujo en 22.5% mientras

que la agroindustrial fue 22.7% menor. Por lo anterior, la producción de azúcar de la región cayó en 17.1%.

En lo referente al impacto ambiental, los ingenios de esta región redujeron el uso de combustóleo en 7.2% pero continúan siendo los que más lo utilizan (60% del total del sector). La cosecha por el método de quema descendió en 18.4% y el BC emitido se incrementó en 14.6% para alcanzar las 4,238 toneladas en 2021. (Cuadro 1). No obstante, la principal razón de la reducción de las emisiones se debió al decremento en la producción de la caña de azúcar, dado que ésta tiene una relación directa con la emisión de contaminantes del aire como el BC.

Cuadro 1. Parámetros e indicadores de la Región Noreste.

Zafra	Superficie (ha)	Rendimiento en campo (t/ha)	Caña (t)	Azúcar (t)	Rendimiento agroindustrial (t/h)	Combustóleo (l)	Caña quemada (%)	Carbono negro (t)
2012/13	161,143	74.2	11,851,987	1,394,300	8.7	14,053,372	85.6	4,965
2020/21	174,243	57.5	9,868,764	1,156,265	6.7	13,035,696	69.9	4,238

El desarrollo de esta zona se ha relegado hacia la parte serrana por la competencia que existe con la ganadería y los granos forrajeros, sin olvidar que, además que forma parte del corredor sojero de México (INIFAP, 2014) (Figura 5).

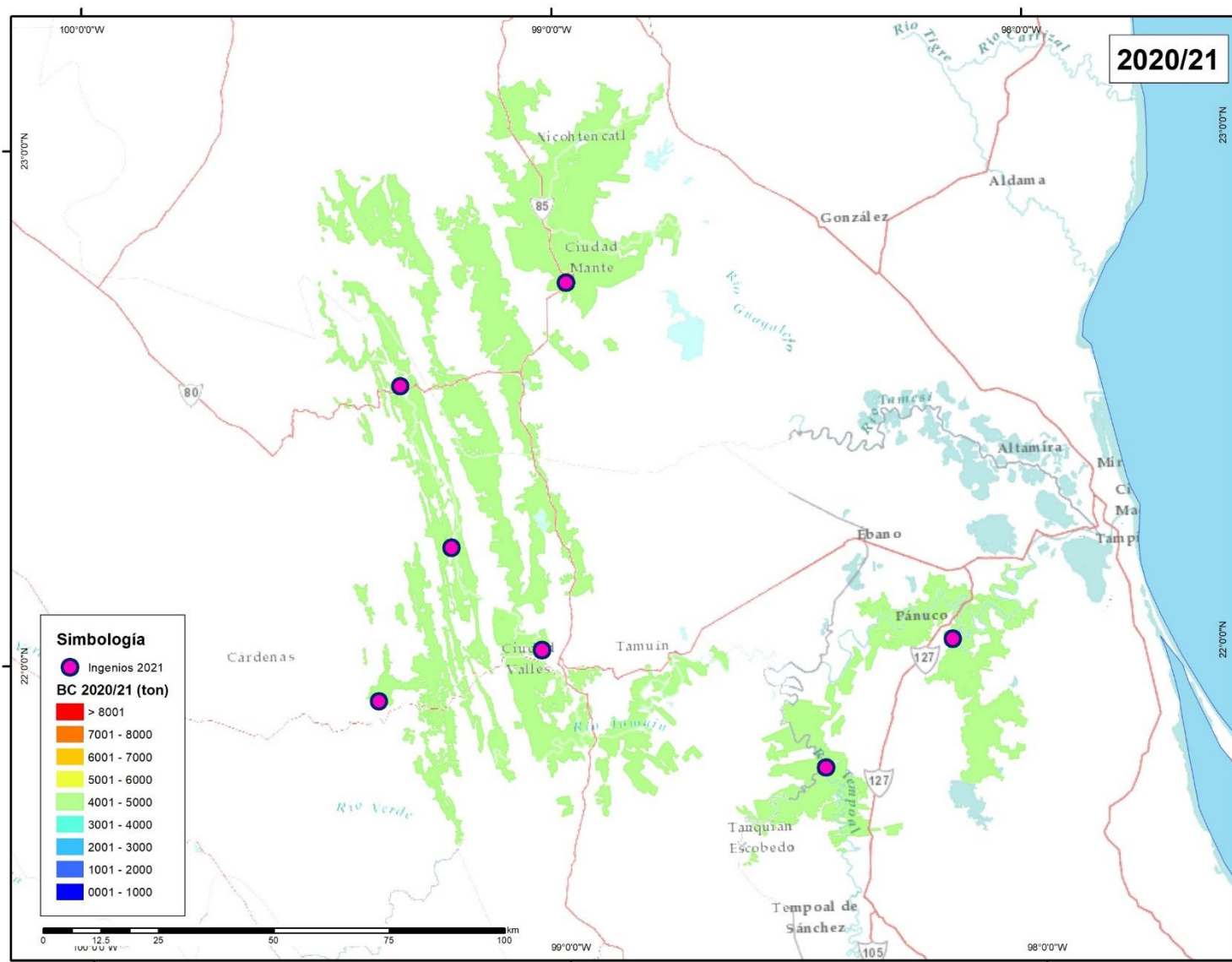


Figura 5. Región cañera Noreste y sus emisiones de carbono negro (BC).

3.1.2. Región Golfo

Es la región con mayor superficie cañera (322 mil 249 hectáreas cosechadas en la zafra 2020/21) y con más ingenios (20 de 49) del país; se sitúa entre el centro de Veracruz, el norte de Oaxaca y el oriente de Puebla. Su productividad ha sufrido pérdidas importantes, dado que su rendimiento en campo se redujo en 19% y la calidad de su producción en 22.6%. Con todo y ello, en esta región se produce 37.8% de la caña y 35.7% del azúcar nacional.

Debido a la magnitud de su producción es la región cañera más contaminante. A pesar de la reducción del 87.2% del uso de petróleo en sus ingenios, 95.3% de su caña se continúa quemando en la cosecha y emite 39.2% del BC generado por el sector en el país, pero sus emisiones se redujeron en 17.4% durante el periodo (Cuadro 2). La caña compite en la zona con cultivos tan importantes como la papaya, el chile, la piña y el chayote (Bada y Rivas, 2010), lo que implica la posibilidad de su sustitución ante cambios adversos (Figura 6).

Cuadro 2. Parámetros e indicadores de la Región Golfo.

Zafra	Superficie (ha)	Rendimiento en campo (t/ha)	Caña (t)	Azúcar (t)	Rendimiento agroindustrial (t/h)	Combustóleo (l)	Caña quemada (%)	Carbono negro (t)
2012/13	331,497	76.9	24,482,756	2,693,962	8.3	50,611,849	95.0	10,450
2020/21	322,249	62.3	19,407,743	2,037,393	6.4	7,815,892	95.3	8,632

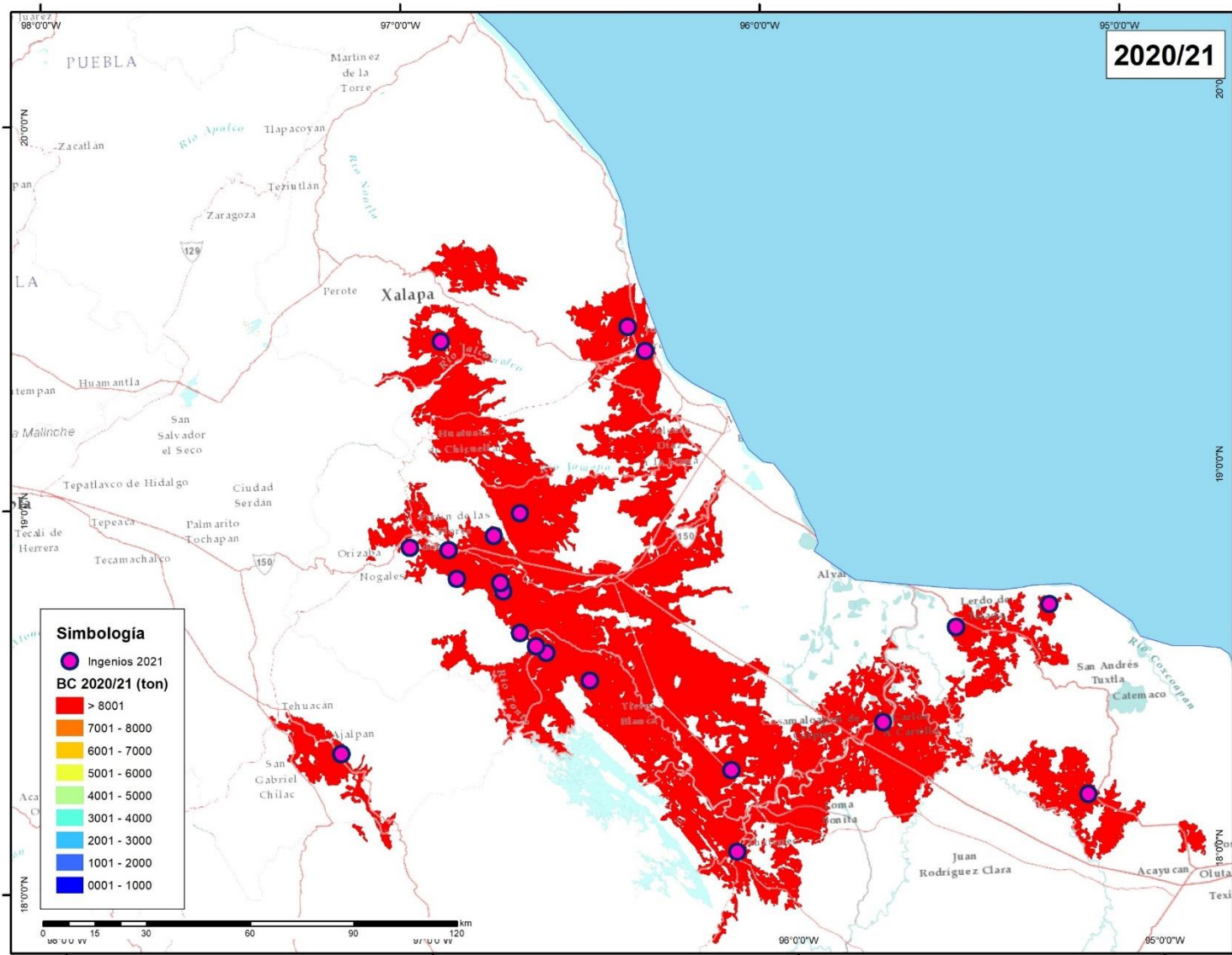


Figura 6. Región cañera Golfo y sus emisiones de carbono negro (BC).

3.1.3. Región Sureste.

Está integrada por cinco ingenios que comparten características agroecológicas y culturales, pero geográficamente es la región cañera más dispersa al situarse entre cuatro estados de la república (SADER y CONADESUCA, 2019b). Con una superficie cosechada de 121 mil 675 hectáreas (zafra 2020/21), es la tercera región más extensa del país, ocupando 15.4% de la superficie cañera. Durante el periodo fue la región que mostró un mayor dinamismo expandiendo su superficie en 25.8%. No obstante, su producción de azúcar no creció debido a la caída sus parámetros productivos y se producción de azúcar (827 mil toneladas), representa 14.5% del total nacional.

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 a sectores muy arraigados y a 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, et al., 2018).

Por otra parte, sus parámetros de eficiencia decrecieron, como el rendimiento en campo que se redujo en 14.7% y el agroindustrial en 12.6%. Según información de CONADESUCA, se dejó de utilizar por completo derivados del petróleo por los ingenios y la práctica de la quema de la caña decreció en 5.7%. Dadas estas cifras, las emisiones de BC decrecieron 2.3%, pero debido a que, a pesar del incremento sustancial de su superficie, se redujo la productividad, lo que dio como resultado una disminución en la caña producida y procesada (Cuadro 3) (Figura 7).

Cuadro 3. Parámetros e indicadores de la Región Sureste.

Zafra	Superficie (ha)	Rendimiento en campo (t/ha)	Caña (t)	Azúcar (t)	Rendimiento agroindustrial (t/h)	Combustóleo (l)	Caña quemada (%)	Carbono negro (t)
2010/11	93,409	57.0	5,667,430	627,242	6.2	9,308,366	92.9	2,471
2020/21	121,675	66.9	7,800,798	827,298	7.2	0	90.1	3,301

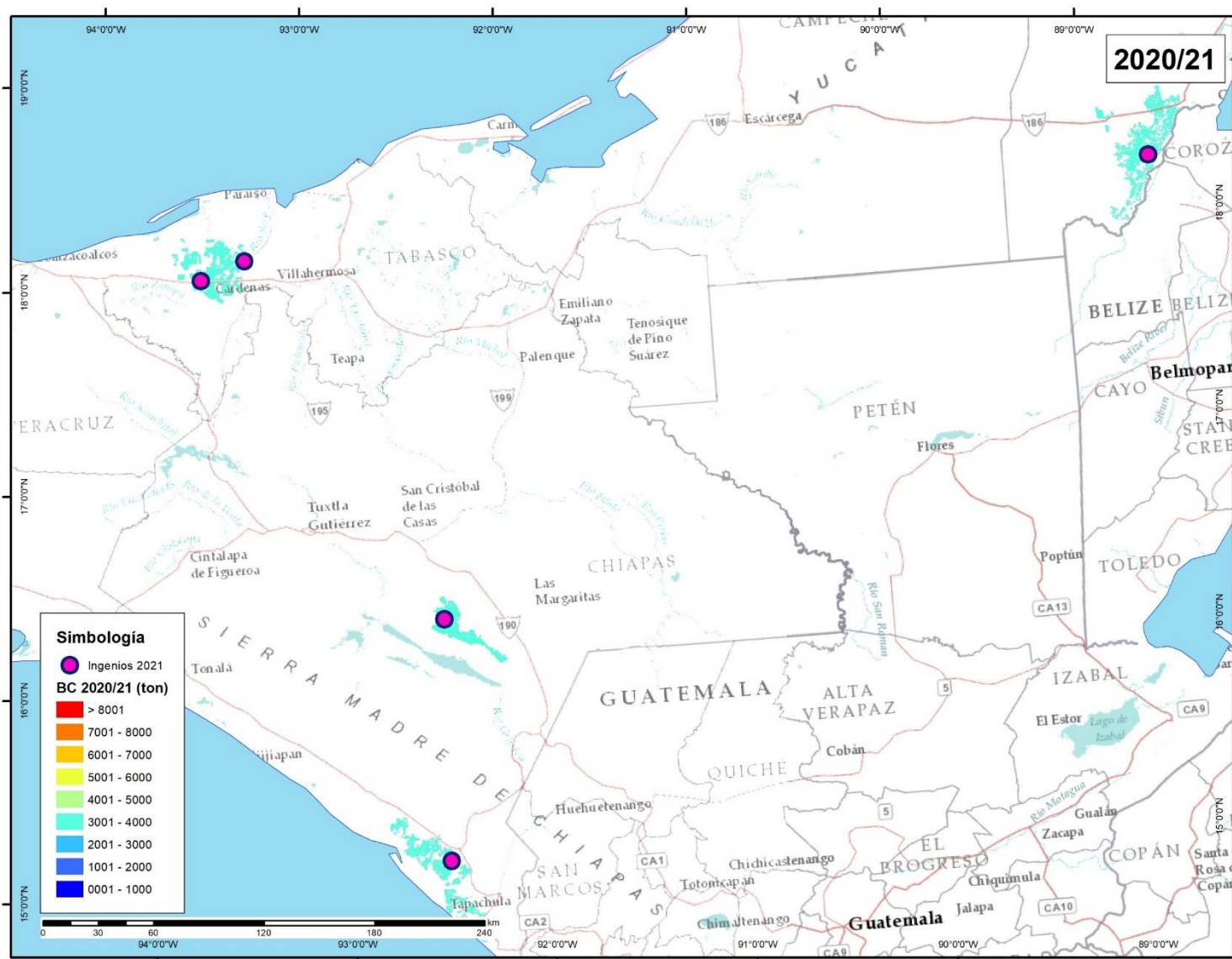


Figura 7. Región cañera Golfo y sus emisiones de carbono negro (BC).

3.1.4. Región Centro

Entre el estado de Morelos y el occidente de Puebla, es la región más pequeña en cuanto a superficie cosechada, con sólo el 4.1% de la zona cañera nacional (32 mil 776 hectáreas). Actualmente el sector es presionado por la creciente urbanización de la zona, derivada su ubicación privilegiada, al ser la zona productora 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 con una reducción de 8.7% en su rendimiento en campo y de 9.2% en el agroindustrial, lo que provocó una contracción de 10.7% de su producción de caña y una proporción similar en el 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 6.6% por la reducción de su producción (Cuadro 4) (Figura 8).

Cuadro 4. Parámetros e indicadores de la Región Centro.

Zafra	Superficie (ha)	Rendimiento en campo (t/ha)	Caña (t)	Azúcar (t)	Rendimiento agroindustrial (t/h)	Combustóleo (l)	Caña quemada (%)	Carbono negro (t)
2010/11	29,357	104.1	3,084,720	398,518	13.5	6,871,636	94.5	1,407
2020/21	32,776	103.4	3,411,486	449,503	13.7	0	99.3	1,431

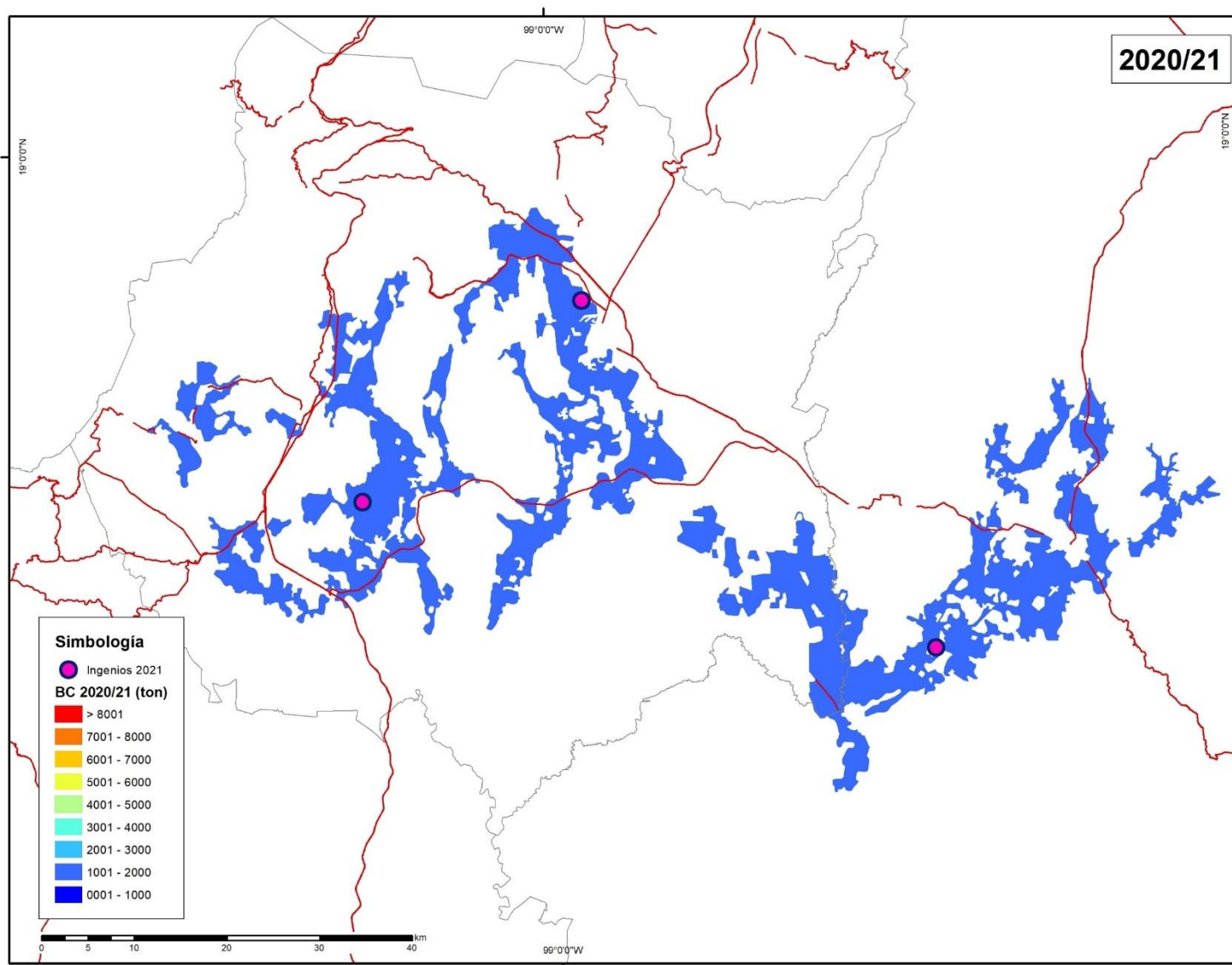


Figura 8. Región cañera Sureste y sus emisiones de carbono negro (BC).

3.1.5. Región Pacífico

Situada entre los estados de Jalisco y Michoacán, ocupa 13.3% de la superficie cañera de México con una superficie cosechada de 105 mil 433 hectáreas durante la zafra 2020/21. Al igual que en la mayoría de las regiones cañeras del país, su productividad decreció en el periodo de forma considerable: 17.8% en rendimiento en campo y 21% en rendimiento agroindustrial, por lo que su producción de azúcar se redujo casi en 20%.

En esta región se producen algunos de los cultivos más redituables del país: agave, aguacate y limón, quienes son fuertes competidores de la caña de azúcar al alcanzar mejores precios y más opciones de comercialización. Es por ello 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 y la quema de la caña se redujo en 3.7%, lo que aunado al decremento de 19.4% de su producción de caña, hizo descender sus emisiones de BC en 20.9%. Esta región es un claro ejemplo de la estrecha relación que guardan la producción y las emisiones de BC, en este sector (Cuadro 5) (Figura 9).

Cuadro 5. Parámetros e indicadores de la Región Pacífico.

Zafra	Superficie (ha)	Rendimiento en campo (t/ha)	Caña (t)	Azúcar (t)	Rendimiento agroindustrial (t/h)	Combustóleo (l)	Caña quemada (%)	Carbono negro (t)
2010/11	86,189	80.2	6,919,937	789,078	9.2	10,128,134	94.6	2,884
2020/21	105,433	79.9	8,520,659	969,542	9.1	0	90.2	3,411

3.1.6. Región Noroeste

Entre los estados de Nayarit y Sinaloa se ubica esta región que se considera la más endeble del sector cañero azucarero mexicano. No sólo cerraron dos de sus cinco ingenios, sino que su superficie cosechada se ha reducido drásticamente, particularmente en el estado de Sinaloa (75% menos que en 2012/13). También hay un marcado descenso de su productividad en campo (-3.9%) y agroindustrial (6.7%). Actualmente la región produce 35% menos que durante la zafra 2012/13.

Sinaloa tiene una agricultura altamente tecnificada con cultivos muy rentables como las hortalizas, por lo que, al encontrar condiciones adversas, los productores y empresarios de caña de azúcar cambian fácilmente de actividad productiva (Santiago Zárate et al., 2021).

En cuanto al impacto ambiental, la región es de las pocas en las que se continúa utilizando petróleo, aunque en una cantidad mucho menor que en 2013 (-81.5%), aunque la práctica de cosecha por el método de quema ha decrecido discretamente, sus emisiones de BC han descendido en 40.2% por descensos en la producción y no por mejoras en sus sistemas (Cuadro 6) (Figura 10).

Cuadro 6. Parámetros e indicadores de la Región Noroeste.

Zafra	Superficie (ha)	Rendimiento en campo (t/ha)	Caña (t)	Azúcar (t)	Rendimiento agroindustrial (t/h)	Combustóleo (l)	Caña quemada (%)	Carbono negro (t)
2010/11	42,335	77.8	3,102,409	351,195	8.4	1,190,957	98.0	1,321
2020/21	33,621	69.3	2,347,316	271,916	7.8	972,794	98.4	990

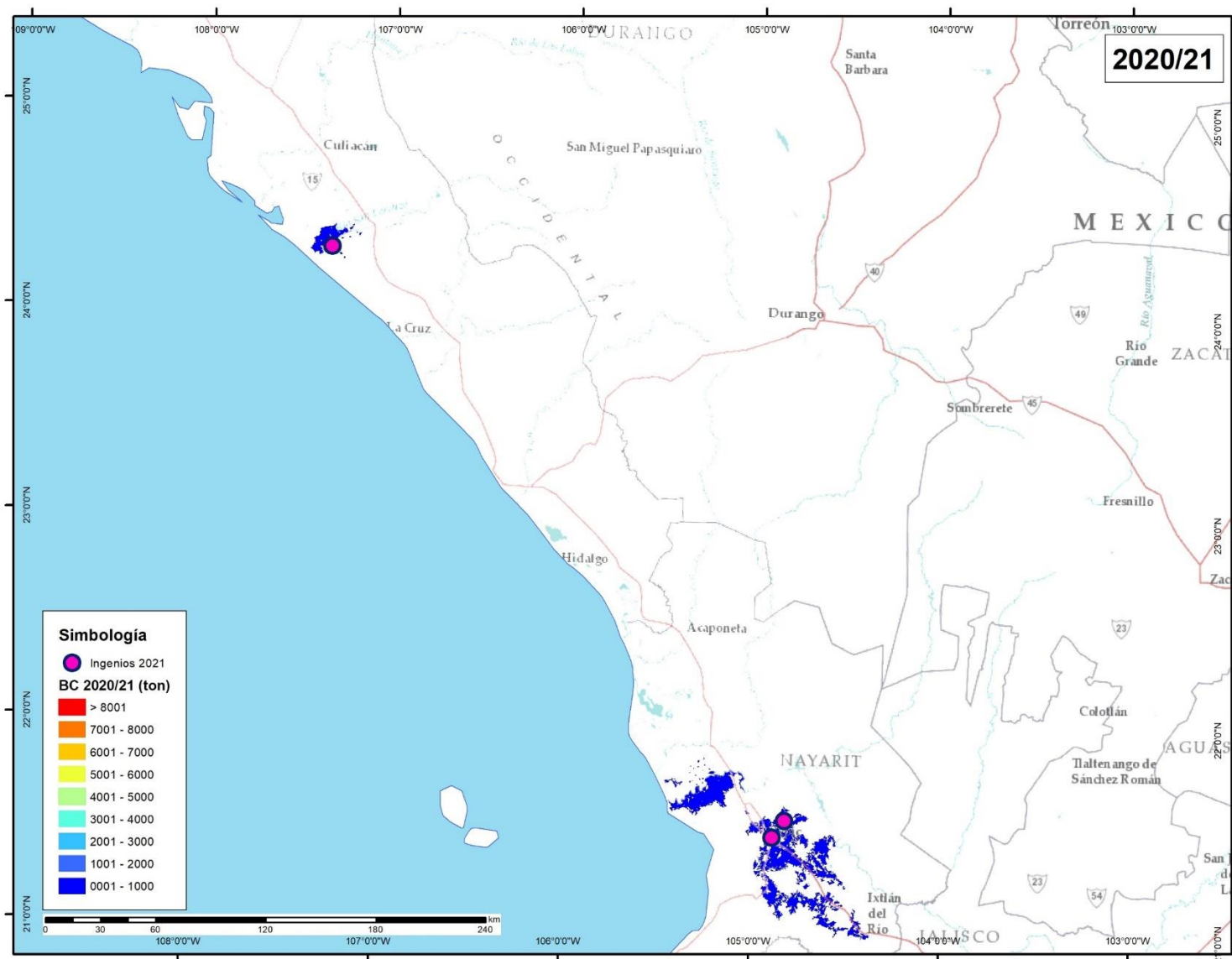


Figura 10. Región cañera Noroeste y sus emisiones de carbono negro (BC).

3.2. 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 como la volatilidad de los precios internacionales del azúcar (Winton, 2019; OECD/FAO, 2021) y el abandono del sector por parte del gobierno, provocando un declive sostenido (González y Meneses, 2015).

Además, sus prácticas productivas e industriales son altamente contaminantes a pesar de su importancia económica y social (Pérez Cruz, 2015). El uso de maquinaria agrícola, la quema de los cañaverales durante la cosecha, el gran número de vehículos pesados utilizados durante la zafra y los derivados del petróleo y bagazo de caña como principales combustibles para los procesos industriales, generan una gran cantidad de contaminantes del aire.

Todos estos factores permiten afirmar que la continuidad del sector está en riesgo, sin contar 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 cuenta con características particulares y una problemática propia; de hecho, algunas regiones se encuentran en pleno crecimiento en tanto que otras muestran síntomas de franco declive y riesgo de desaparecer.

La Región Golfo es la principal con la mayor superficie y número de ingenios y también 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 encuentran en riesgo por la presión de la urbanización, derivada de su ubicación geográfica.

La Región Pacífico cuenta con buena productividad, pero sin grandes mejoras 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.

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 cuenta con la mayor tecnificación del país por lo que es capaz de producir importantes cantidades de hortalizas de exportación por lo que, ante la inestabilidad del sector, productores e industriales han optado por cultivos más redituables y estables.

4. CONCLUSIONES O HALLAZGOS

La inestabilidad de los precios del azúcar y condiciones de producción variables, entre otros muchos factores, han propiciado que el sector cañero azucarero represente una alternativa cada vez menos atractiva para los productores e industriales de varias regiones cañeras del país.

Quienes han decidido quedarse, han apostado por la expansión territorial y no por la modernización de sus sistemas de producción, que además de obsoletos son muy contaminantes. Un claro ejemplo es la emisión de contaminantes como el BC, que si bien se ha reducido de 2013 a la fecha, no lo ha hecho 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 grandes consorcios azucareros, han contribuido en el estancamiento e incluso el retroceso del sector en términos de productividad y diversificación.

En lo concerniente al impacto ambiental generado, y tomando las emisiones de BC como un indicador de este, 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.

Dada la relación directa que existe entre la producción e industrialización de la caña de azúcar (sobre todo la segunda actividad) y las emisiones de contaminantes del aire como el BC, se puede afirmar que actualmente el sector cañero de México es más amplio en superficie, pero menos productivo, dependiente del temporal y los precios del azúcar y continúa siendo sucio. Ello implica que cuando las condiciones mejoren y se produzca más, sus emisiones también crecerán a un ritmo similar al de su producción.

Resulta indispensable 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 que se deben de considerar para asegurar su permanencia en el campo mexicano.

5. REFERENCIAS Y CITAS

- Aguilar Rivera, N., Galindo Mendoza, G., Fortanelli Martínez, J. y 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>
- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, 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. y 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. y Vázquez Salguero, D. E. (2018–2019). *Medio ambiente, sustentabilidad y vulnerabilidad social: Vol. V–V*. COMECOSO.
- Carrillo Enciso, H. G. (2018, 21 marzo). 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>
- Centro de Estudios de las Finanzas Públicas (CEFP). (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-Pölloth, C., Ngiewih, Y. 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/10.1080/10408444.2017.1391746>
- Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA). (2021). 8° Informe Estadístico del Sector Agroindustrial de la Caña de Azúcar en México. En *Gobierno de México*. <https://www.gob.mx/conadesuca/es/articulos/8-informe-estadistico-del-sector-agroindustrial-de-la-cana-de-azucar-en-mexico?idiom=es>
- Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA). (2022). *Reportes*. Sistema Sinfocaña. <https://www.gob.mx/conadesuca/acciones-y-programas/sistema-infocana>
- Gobierno de México. (2015, 2 de diciembre). *Los compromisos de México ante el Cambio Climático*. <https://www.gob.mx/gobmx/articulos/los-compromisos-de-mexico-ante-el-cambio-climatico>
- González Muñoz, O. y 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>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (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

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). (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. y 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. y Alvarez 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>

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

Organization for Economic Cooperation and Development (OECD) y Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021). Azúcar. En *OCDE-FAO 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. y 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. <http://revistainclusiones.com/carga/wp-content/uploads/2022/01/3-Pedro-Mexico-VOL-9-NUMESPC-ENEMAR2022INCL.pdf>

Quintana-Quintalán, O. M. (2021, March). *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 Alcala, 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>

Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2009). *Digitalización del Campo Cañero en México para Alcanzar la Agricultura de Precisión de la Caña de Azúcar*. <https://www.siiba.conadesuca.gob.mx/siica/Consulta/>

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2021, 13 marzo). *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>

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) y Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA). (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

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) y Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA). (2019). 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

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (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>

Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2022). *Producción Agrícola*. Cierre de la producción agrícola. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>

Solleiro, J. L., Castañón, R., Salinas, C. M. y 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. y 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>

United States Environmental Protection Agency (EPA). (2022, 20 de enero). *AP-42: Compilation of Air Emissions Factors*. US EPA. <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors>

Varillas, A. & Castro, A. (2022, 31 agosto). *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/>

Winton. (2019, 23 de octubre). *A History of Sugar Prices*. <https://www.winton.com/longer-view/the-sweet-and-sour-history-of-sugar-prices>

III. MAPA DE QUEMA DE CAÑA DE AZÚCAR DURANTE LA ZAFRA 2021-2022 EN SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

MAP OF THE SUGARCANE BURNING DURING THE 2021-2022 HARVEST IN SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

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

Published online: 30 June 2023

DOI: <https://doi.org/10.22201/igg.25940694e.2023.1.100>

Volume: 7, Issue: 1, Pages: 1-9



Mapa de quema de caña de azúcar durante la zafra 2021-2022 en San Luis Potosí,
México[☆]

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

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

^aPrograma Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Av. Manuel Nava 201, 2o. piso, Zona Universitaria, CP 78397, San Luis Potosí, San Luis Potosí, México

^bLaboratorio Nacional de Geoprocetamiento 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.

^cInstituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Circuito de la Investigación Científica, CP 04510, Ciudad de México, CDMX, 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 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.

Alrededor de 40% de las emisiones mundiales de la agricultura provienen del ganado, 16% de los fertilizantes minerales, 17% de la quema de biomasa y 8% de los desechos agrícolas. Las 4 principales actividades agrícolas que generan toxinas que se liberan al aire son: fertilizantes y pesticidas, ganadería, desechos agrícolas y sales del agua de riego aplicada (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 (CO_2 , N_2O , CH_4), contaminantes atmosféricos (CO , NH_3 , NO_x , SO_2 , 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 por pérdidas en 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. Lo anterior queda de manifiesto por 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 (DOF, 2012). 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 quemaduras realizadas durante la zafra 2021-2022 de la caña de azúcar, en las zonas cañeras que abastecen a los ingenios ubicados en el estado de San Luis Potosí, y que constituyen un importante contribuyente a la emisión de gases y compuestos de efecto invernadero (GYCEI). Todo ello, en el marco de los compromisos de reducción de emisiones de GEI contraídos por México durante la COP21 y en aras de buscar una industria cañera sostenible.

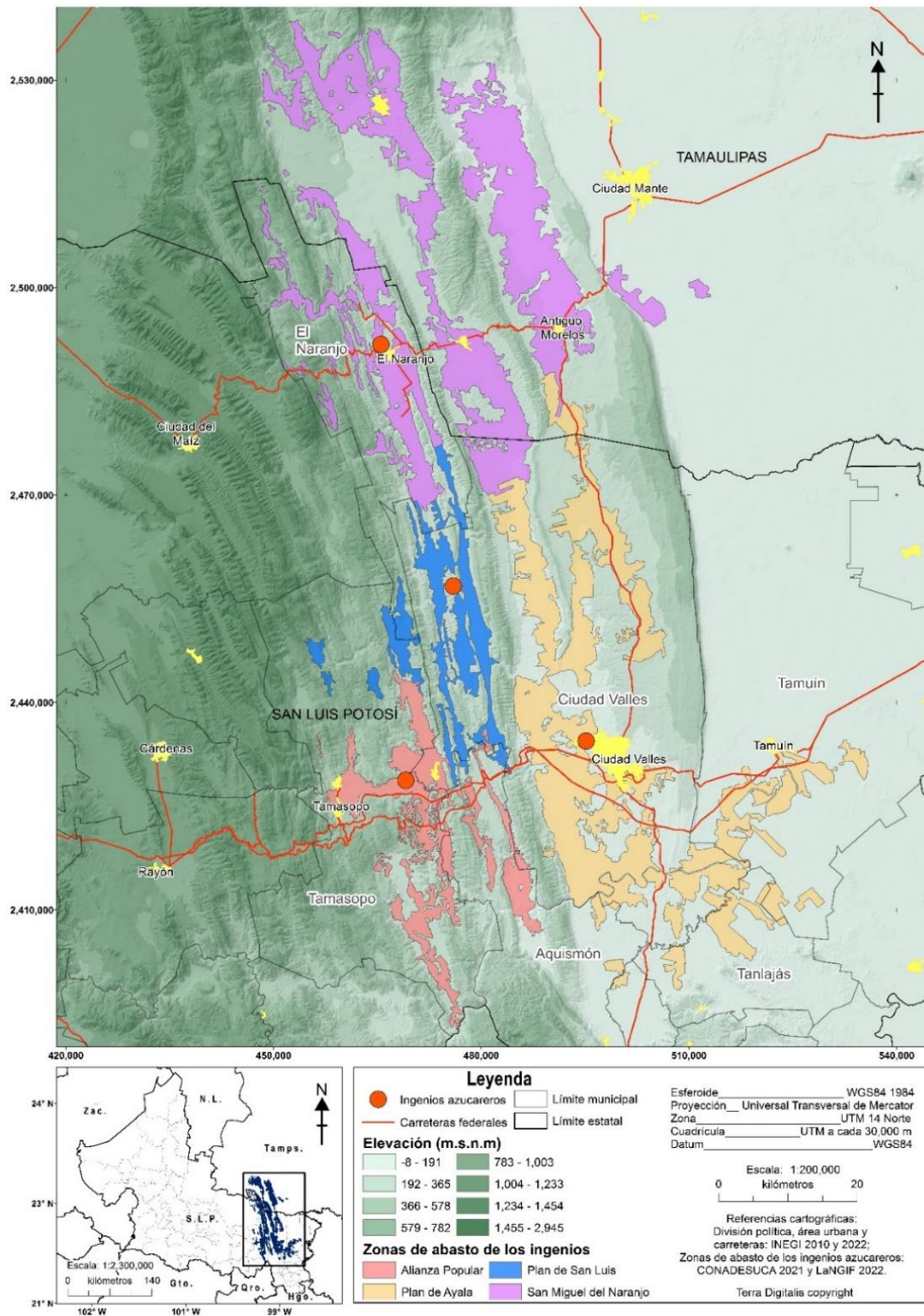
2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

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. 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 practica 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 por límites elegidos arbitrariamente, que mantienen un equilibrio dinámico en el espacio y el tiempo. Estos se crean por la alteración de un ecosistema por parte del ser humano, 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, utilizando la clasificación del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), pero 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.

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (1)$$

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.

$$dNBR \text{ o } \Delta NBR = NBR_{Prefuego} - NBR_{Postfuego} \quad (2)$$

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 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 (Tabla1), 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).

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 ³)		Nivel de severidad
	Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	Límite superior	
	-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

Fuente: UN, 2018.

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 Fragoso-Servon 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

En la Tabla 2 se muestra 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). 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.

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 mil.

	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

***Fuente:** Elaboración propia.

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 (CONADESUCA, 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 el mapa que muestra los resultados obtenidos.

Mapa de quema de caña de azúcar durante la zafra 2021 - 2022 en San Luis Potosí, México



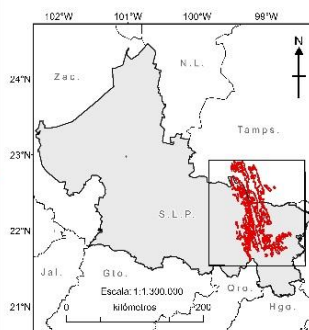
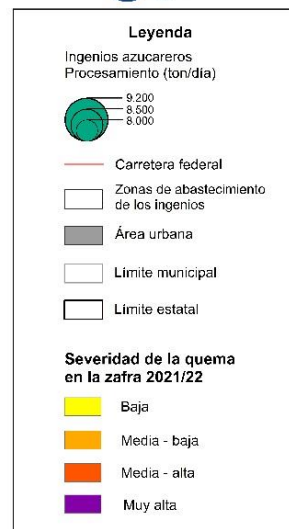
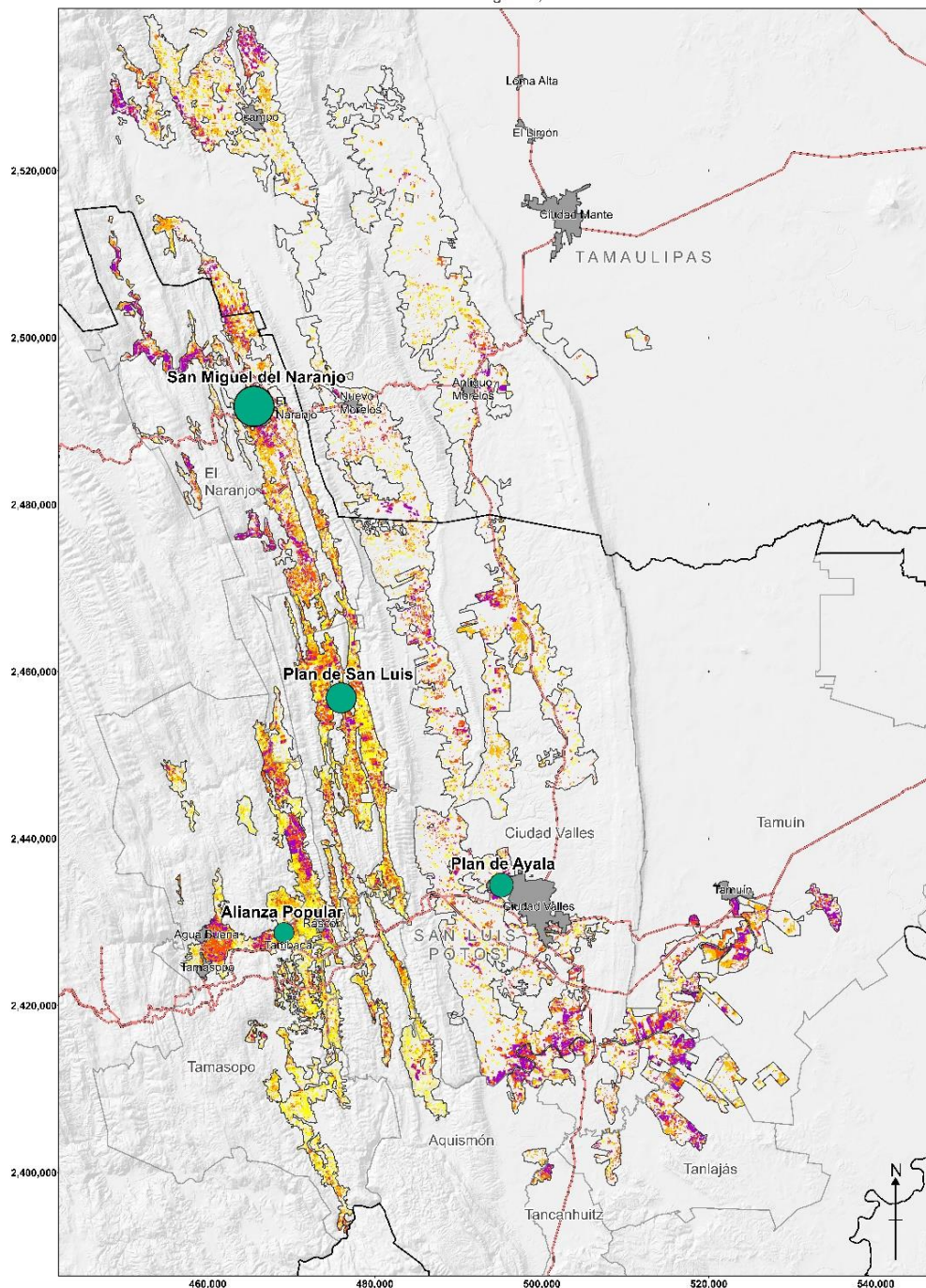
terra digitalis
International e-journal of maps

Pedro Pérez Medina¹, María Guadalupe Galindo Mendoza², María Teresa Sánchez Salazar³ y Ángel de Jesús Quiroz Gaspar²

¹Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

²Laboratorio Nacional de Geoprocusamiento de Información Fitosanitaria, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

³Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.



Escala 1:100,000
0 kilómetros 16

Esferoide WGS84 1984
Proyección Universal Transversal de Mercator
Zona UTM 14 Norte
Cuadrícula UTM a cada 20,000 m
Datum WGS84

Referencias cartográficas:
División política, área urbana y carreteras: INEGI 2010 y 2022.
Zonas de abasto: CONADESUGA 2021 y LANGIF 2022.
Severidad de la quema de zafra obtenida de imágenes Sentinel-2: ESA 2021/22.

Terra Digitalis copyright

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.

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 mil.

	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

Fuente: Elaboración propia.

Asumiendo una relación directa entre cantidad de biomasa quemada (ton) y la emisión de contaminantes del aire, se considera 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, ésta se utilice para tener más elementos en la evaluación.

Un caso particular es el ingenio San Miguel del Naranjo que, a pesar de ser la zona cañera más extensa del estado, al realizar una proporción menor de quemas, tener un menor rendimiento en campo y mostrar una menor severidad en sus quemas, se considera 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).

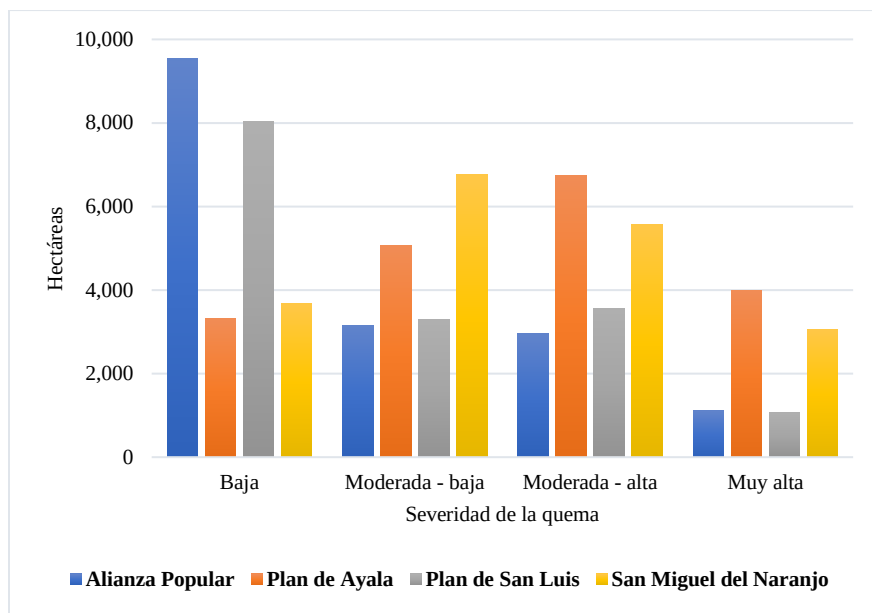


Figura 2: Grado de severidad de las quemas durante la zafra 2021-2022, por ingenio/
Figure 2: Degree of severity of burns during the 2021-2022 harvest by sugar mil.

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 por cosecha en verde o superficies no cosechadas, ya sea porque su etapa de desarrollo no ameritó su cosecha o porque no se requirió por el ingenio. 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.

6. SOFTWARE

ArcMap 10.5 y Google Earth Engine (GEE).

7. REFERENCIAS

Andreadis, A., Giambene, G., Zambon, R., 2022. Low-Power IoT Environmental Monitoring and Smart Agriculture for Unconnected Rural Areas. 2022 20th Mediterranean Communication and Computer Networking Conference (MedComNet). <https://doi.org/10.1109/medcomnet55087.2022.9810376>.

Ariza, A., 2020. Cartografía de severidad en incendios forestales mediante Google Earth Engine. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14120.60165>.

Baloloy, A. B., Blanco, A. C., Gana, B. S., Sta. Ana, R. C., Olalia, L. C., 2016. Landsat-based detection and severity analysis 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(4W1), 173-179. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlii-4-w1-173-2016>.

Burgos, A., Páez, R., Carmona, E., Rivas, H., 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>.

Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA), 2022. Reportes. Sistema Sinfocaña. Disponible en: <https://www.gob.mx/conadesuca/acciones-y-programas/sistema-infocana>.

Chen, Z., Shao, Y., He, M., Liang, J., Jiang, Y., Wang, Y., Zhou, M., Gong, Z., Zhou, X., Fang, F., Guo, J., 2020. The EMR-rural project: key techniques and devices development for rural environmental monitoring and remediation in China. Environmental Sciences Europe, 32(1). <https://doi.org/10.1186/s12302-020-00343-4>.

Van Dijk, D., Shoaie, S., van Leeuwen, T., Veraverbeke, S., 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>.

Deb, D., 2019. Here are the 10 Main Causes of Air Pollution. AQI India. Disponible en: <https://www.aqi.in/blog/here-are-the-10-main-causes-of-air-pollution/>.

Diario Oficial de la Federación (DOF), 2016. NORMA Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5259464&fecha=16/07/2012#gsc.tab=0.

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.aosas.2020.10.001>.

Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO), 2020. Emissions due to agriculture: Global, regional and country trends 2000-2018. En Food and Agriculture Organization of United Nations (FAO) (FAOSTAT Analytical Brief Series No. 18). Disponible en: <https://www.fao.org/3/cb3808en/cb3808en.pdf>.

Fragoso-Servón P., Pereira-Corona A., Prezas-Hernández B., 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. <https://doi.org/10.19044/esj.2023.v19n6p330>.

Giglio, A., Boschettib, L., Royc, D. P., Humbera, M. L., Justicea, C. O., 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., Sutiarto, L., Okayasu, T., 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. Disponible en: <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., 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., 2009. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116. <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., Figueroa-Lara, M. J., González-Cardoso, G., 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. Disponible en: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>.

National Geographic, 2022. Air Pollution. Disponible en: <https://education.nationalgeographic.org/resource/air-pollution/>.

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., 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, O., 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. Disponible en: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S140584212012000100009.

Rickerl, D., Charles, F. (Eds.), 2003. Agroecology and Agroecosystems. En Agroecosystems Analysis. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr43.c2>.

Santiago-De la Rosa, N., Mugica-Álvarez, V., Cereceda-Balic, F., Guerrero, F., Yáñez, K., Lapuerta, M., 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 Ecología y Gestión Ambiental (SEGAM), 2023. Calidad del Aire en San Luis Potosí. Disponible en: <https://slp.gob.mx/segam/Paginas/Inicio.aspx>.

Secretaría de Medio Ambiente, 2022. Mapa Calidad del Aire. Disponible en: http://aire.nl.gob.mx/map_calidad.html.

Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET), 2022. Calidad del Aire AMG. Disponible en: <https://aire.jalisco.gob.mx/mapaf2019>.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) y Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA), 2021. 8° Informe Estadístico del Sector Agroindustrial de la Caña de Azúcar en México. Disponible en: <https://www.gob.mx/conadesuca/documentos/diagnosticos-regionales-de-la-agroindustria-de-la-cana-de-azucar-en-mexico>.

Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), 2022. Producción Agrícola. Cierre de la producción agrícola. Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>.

United Nations (UN), 2018. Normalized Burn Ratio (NBR). Office for Outer Space Affairs UN-SPIDER Knowledge Portal. Disponible en: <https://un-spider.org/advisorysupport/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity/in-detail/normalized-burn-ratio>.

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. En Think Green 2013: Crecimiento verde, retos y oportunidades para México Contaminación. Disponible en: <https://siiba.conadesuca.gob.mx/siiba/Consulta/verDoc.aspx?num=358>.

World Bank (WB) e Institute for Health Metrics and Evaluation University of Washington (IHME), 2016. The Cost of Air Pollution: Strengthening the Economic Case for Action. Disponible en: <https://www.worldbank.org/>.

IV. ASSESSMENT OF BLACK CARBON IN CIUDAD VALLES, SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO, DURING SUGARCANE HARVEST 2020-2021

ABSTRACT

This work evaluates Black Carbon emissions produced in Ciudad Valles, San Luis Potosí, México, during the harvest 2020-2021 of Ingenio Plan de Ayala and its association with the sugarcane sector in its area of influence. Black Carbon concentrations were measured each hour by the 7-wavelength aethalometer (AE-33) from November 13, 2020, to June 7, 2021, at Tecnológico Nacional de México - Campus Ciudad Valles, located northeast of the city, approximately 1 kilometer from Ingenio and bordered by the sugarcane area. The maximum daily concentration recorded was $4.5 \pm 0.072 \mu\text{g m}^{-3}$ with a daily average of $0.9 \pm 0.014 \mu\text{g m}^{-3}$, enough to increase the mortality of the long-term exposed population by almost 6.0% moreover, according to the World Health Organization, and to cause environmental and productive effects. The burning of fossil fuels represented 62.9% of the total Black Carbon, indicating that contrary to official statistics, Ingenio Plan de Ayala may continue using fuel oil. Likewise, there was a statistically significant difference in Black Carbon concentrations during harvest and no harvest periods, indicating a direct relationship between its emissions and the sugarcane sector of this region. The highest concentrations were in the surrounding area of Ingenio Plan de Ayala and sugarcane lands, which supports the previous theory. With the results obtained, the bottom line is that evaluating other agricultural burning emissions near the growing cities is necessary to minimize adverse effects on human health and reduce CO₂eq emissions.

Keywords: sugarcane burning, fossil fuels, global warming, human diseases.

1. INTRODUCTION

Pollution is the introduction of a contaminant into a natural environment that causes instability, disorder, damage, or discomfort in an ecosystem, physical environment, or living beings. Although natural sources and human activities generate a significant proportion. Different classes or types of pollution depend on the environment affected and the extent of the source. Air pollution from industries, construction sites, agricultural practices, vehicles, and the combustion of dirty energy sources, is the fourth deadliest health risk in the world, causing one in ten deaths. Anthropogenic air pollution is the leading cause of climate change (UN, 2022). In the last 100 years, the average global temperature has increased by 0.76 °C, and approximately 87.0% of the world's population is exposed to pollution levels that exceed air quality guidelines set by World Health Organization (WHO). Premature deaths due to air pollution cost the global economy \$225 billion in lost labor income, equivalent to the combined gross domestic product of India, Canada, and Mexico. Because of its severity, pollution control should be a priority for country governments; however, this expenditure always competes with other budget priorities and political interests (IHNME & WB, 2016).

One of the primary air pollutants is Particle Matter (PM); this term describes solid or liquid particles ($<100\text{ }\mu\text{m}$) that are present airborne and dispersed. This complex heterogeneous mixture of chemical compounds (organic and inorganic) can react and change depending on thermodynamic properties, emission sources (natural or anthropogenic), and meteorological conditions (WHO, 2013). For example, $\text{PM}_{2.5}$, particles less than or equal to $2.5\text{ }\mu\text{m}$, are highly produced by anthropogenic sources in urban areas with a residence life in the atmosphere for weeks or days but can travel hundreds of miles. Therefore, it implies that studying them for their local or global effects is very important.

Black carbon (BC) is an air pollutant contained mainly in $\text{PM}_{2.5}$. It is a type of carbonaceous material formed primarily from combustion, emitted directly into the atmosphere, and with a unique combination of physical properties. It strongly absorbs visible light, is refractory, and has a vaporization temperature near 4000K . In addition, it is an aggregate of small spheres and insoluble in water and common organic solvents. BC plays a significant role in the Earth's climate system because it absorbs solar radiation, influences cloud processes, and alters the meltdown of snow and ice sheets. Since a large fraction of its atmospheric concentrations is due to anthropogenic activities, reducing its concentrations could represent an efficient environmental strategy because BC is rapidly removed from the atmosphere by deposition, which could decrease the global climate forced by human activities in the short term and its associated rate of climate change (Bond et al., 2013). Also, it is the second most potent agent of climate change, with a warming potential equivalent to 55.0% of that attributed to CO_2 (Liu et al., 2022).

The direct exposure of humans to BC is associated with health damages such as cardiac arrest and failure (Burroughs-Peña & Rollins, 2018), blood strokes (Mordukhovich et al., 2009), lung cancer (Yong et al., 2019), chronic bronchitis, asthma, emphysema (Paunescu et al., 2019), and low birth weight (Bové et al., 2019); as well as severe dehydration, acute renal dysfunction, and genotoxicity (Chaudhuri et al., 2017). Given the association of its emissions with other highly harmful pollutants, such as polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), BC is considered the principal indicator of air quality in human health (Casares-Long, Longhurst and Barnes, 2020). Recent research has found that in cities as polluted as Delhi, India, the daily average BC concentrations are $24.4\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$, but with episodes higher than $59.9\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ (Dumka et al., 2018).

As for effects on human health, the WHO indicates that exposure of the population to $10.0\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ of BC, in the short term, can increase mortality by 0.9% from cardiovascular diseases and 0.7% from other causes. Moreover, prolonged exposure to $1.0\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ would increase the risk of death by 6.0% (Janssen, 2012). Additionally, Tobias et al. in 2014 concluded that increments of $1.4\text{ }\mu\text{g m}^{-3}$ increase respiratory mortality risk by 10.0%.

There are two main techniques for quantitative measurement of BC groups: those based on thermal properties and those using the optical properties of the pollutant (Slowik et al., 2007). Optical techniques usually measure light absorption by aerosols, which is then empirically related to BC content (Ahmed et al., 2009). An example is Soot Particle Absorption Photometer which performs a filter-based absorption measurement (Cremer et al., 2022). Similarly, there is a Photoacoustic Spectrometer, which measures sound at different wavelengths to identify its absorbing components (Jin et al., 2021), and a Multi-

angle Absorption Photometer, which is capable of simultaneously measuring radiation fields in the front and back hemispheres concerning an aerosol filter system (Abdullah et al., 2022). Among these commercial BC monitors, filter-based absorption photometers, such as aethalometers, are the most widely used in air quality monitoring stations of their robust precision design (Kalbermatter et al., 2022; Srivastava et al., 2021).

Many researchers have conducted several studies with Aethalometers around the world: emissions from fireworks (Rawat et al., 2022), transportation (Minderyté et al., 2022), materials production (Hedmer et al., 2022), and burning of agricultural residues (Sight et al., 2014) and firewood (Li et al., 2022). Also, variations in BC concentrations and composition generated by extraordinary events, such as pandemics caused by COVID-19 (Pandey & Negi, 2022); seasonal (Sharma et al., 2022) or diurnal (Yan et al., 2022), have been observed. In the same way, there were analyzed differences in BC concentrations in rural and urban environments (Kouassi, 2021) or their effects in remote places such as Antarctica (Gonçalves Jr. et al., 2022).

There are also no unified international or national standards or criteria on the effects of BC concentrations at different levels, but studies have shown that deposition of between 100 and 300 ng-BC/g¹-H₂O of BC can reduce the albedo from 2.7% to 6.0%. It may increase when continuously runoff between 70 and 204 millimeters of water (Suárez et al., 2017).

Mexico has a National Black Carbon Monitoring Network that performs intermittent monitoring in 9 cities. In Mexico City, annual average concentrations exceed 2.5 µg m⁻³ (Peralta et al., 2019), In other overriding conurbations in México, such as Guadalajara, Jalisco, the average is 3.1 µg m⁻³ and in Monterrey, Nuevo León, it is 3.6 µg m⁻³ (INECC, 2016). In the case of the city of San Luis Potosí, the annual average concentration for the year 2018 is 1.11 µg m⁻³ in the northern part of the city (Zapata-Ramírez, 2022) and 2.04 µg m⁻³ in the southern one in the year 2020 (Cueto-Delgadillo, 2021).

Mexico has established the Intended Nationally Determined Contribution (INDC) program to reduce national emissions of BC in unconditional mitigation goals for the following years, which México's Government expects to reduce around 51 % of the BC emissions by 2030. Due to their importance, several techniques have been developed to estimate their emissions, sources, and potential effects. In México, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) estimates the emissions of greenhouse gases (GHGs), including BC, through Inventario Nacional de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI); and to make it, INECC uses the traditional Emission Factors method.

According to the Emission Factors method in 2016, the emissions from sugarcane burning in San Luis Potosí were 1,059,728 ± 21,194 tCO₂eq, while those from the sugar mills were 658,949 ± 13,178 tCO₂eq, as well as 6,331 ± 126 t of PM_{2.5} and 1,429 ± 28 t of BC (Quintana-Quintalán, 2022).

Currently, seeks to increase the certainty of the estimations of emissions from the agricultural sector by creating specific emission factors for each crop and area (Mugica-Álvarez et al., 2018), as well as using quantitative techniques through direct monitoring of

agricultural land where the burning takes place. For instance, Jain et al. (2019) conducted a state inventory of air pollutants from crop residue burning, using the IPCC 2006 inventory preparation guidelines, finding the proportions included in Fig. 1.

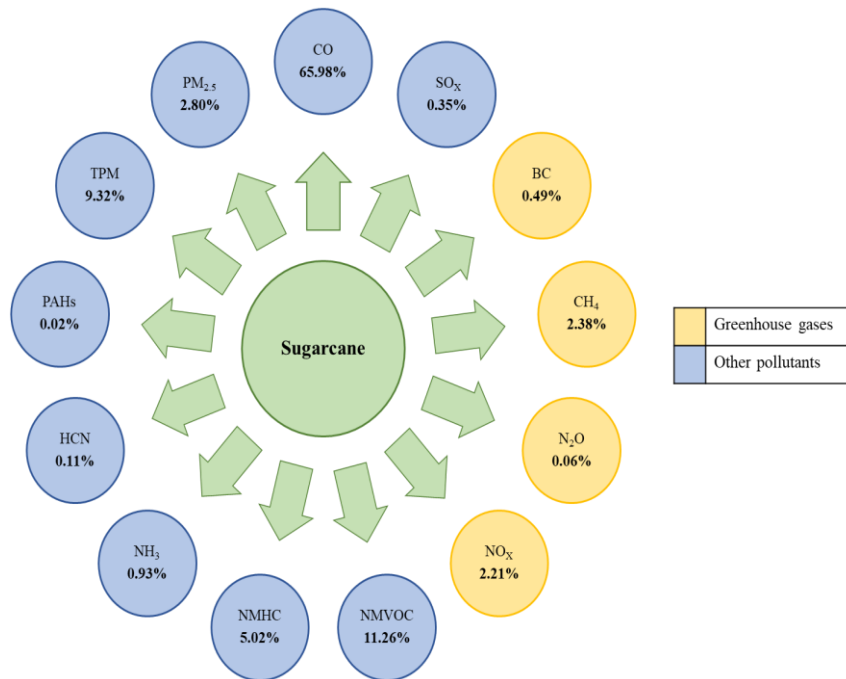


Fig. 1. Air pollutants emitted by the burning of crop residues.

The sugarcane zone of San Luis Potosí is part of the northeastern sugarcane region of México, the second largest in the country (CONADESUCA, 2021). Four mills operate in the state that process sugarcane production for industrial purposes, all located in the Huasteca region. Plan de Ayala and Plan de San Luis in Ciudad Valles; Alianza Popular in Tamasopo, and San Miguel del Naranjo in El Naranjo (Fig. 2).

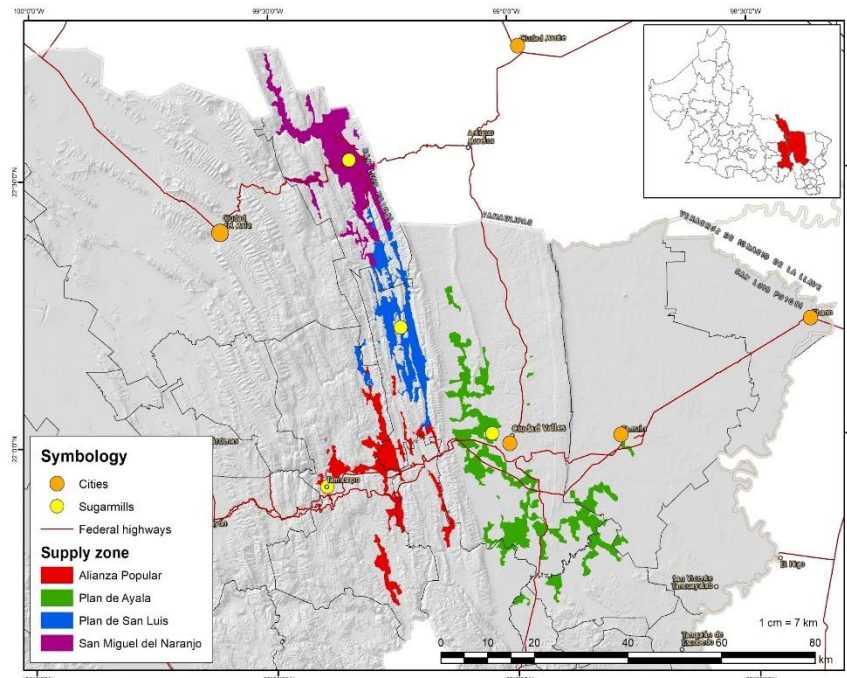


Fig. 2. Sugar mills and sugarcane areas of San Luis Potosí, México.

During the sugarcane harvest 2020-2021, the four mills processed more than 5 billion tons of sugarcane from 103 thousand hectares, producing 644 thousand tons of different qualities of sugar (CONADESUCA, 2022). Sugarcane production generated an income of close to 2.5 billion pesos, making it the third most important crop in the state concerning area harvested and the first in respect of production value (SIAP, 2022). In addition to employing 15 thousand of producers (Beta San Miguel, 2016; Grupo PIASA, 2019; Ingenio Santos, 2020), the sugarcane sector in the state required the labor of more than 1,500 workers in the mills and more than 7,000 cutters during the harvest, as well as a significant number of transporters and indirect employees (CONADESUCA, 2021).

Despite its economic and social importance, this sector's productive and industrial processes have a high environmental impact. First, in 90.0% of the sugarcane area, one or more cultivation tasks do mechanically, which implies the use of diesel fuel. Furthermore, *zafra* (the sugarcane harvest) takes place approximately six months yearly. During this period, the double-burning method harvests 73.3% of sugarcane production, and 1,800 vehicles are used to transport cane from farms to mills and then the processed sugar from mills to distribution or processing centers. Regarding the industrialization process, San Luis Potosí is the sugarcane producer state in the country that uses the most fuel oil (13.69 million liters, equivalent to 56.3% of that used nationally), as well as 11,700 tons of bagasse (CONADESUCA, 2022).

There have been efforts to reduce sugarcane burning. However, this practice is still common in almost the producing countries, causing effects at different scales, from the

local level, such as the diseases caused to the population directly exposed to the global level, such as global warming.

In Mexico, as of 2012, air pollutant monitoring is mandatory only for big cities (NOM-156-SEMARNAT-2012), considering that they are the main emission sites. San Luis Potosí has four monitoring stations that measure criteria pollutants, and in the case of Ciudad Valles, this is the first direct monitoring.

This research is the first to be carried out in the country, with direct monitoring of BC, in a small agro-city of Mexico and associating it with agricultural activity. Its purpose is to evaluate BC concentrations in Ciudad Valles, San Luis Potosí, México, during the 2020-2021 Ingenio Plan de Ayala harvest season. As a result, following the WHO guidelines, it verified the health risk to the exposed population and to find elements that show their possible relationship with activities carried out by the sugarcane sector in this region.

2. MATERIALS Y METHODS

Ciudad Valles is the capital of the municipality of the same name, in San Luis Potosí, México. It is in the eastern part of the state, in the Huasteca region, on the banks of the Tropaón River. With a population of 180 thousand inhabitants, it is a major commercial, tourist, agricultural, and livestock center and the second most important city in the state. Moreover, relevant sugar and cement industries are within it (Fig. 3) (INEGI, 2021).

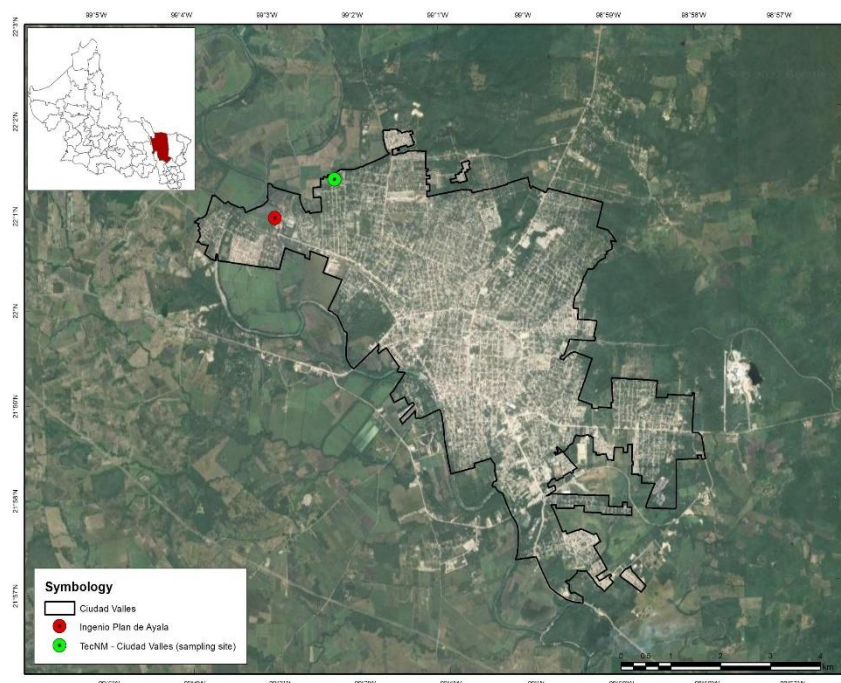


Fig. 3. Measurement site location.

Grupo Santos is the fourth largest sugar corporation in México, with five mills that industrialize the production of 52 thousand hectares, representing 7.7% of the national sugarcane area (CONADESUCA, 2022). Its mills produce sugar of different qualities for the food industry in the domestic market and the United States, as well as molasses for the livestock and pharmaceutical industry, on a smaller scale. These mills are in the process of certifications and approvals for healthy, safe, and innocuous production, such as Kosher, FDA, ISO:9001, and ISO:22000, and clean production (Industria Limpia México).

In the specific case of Ingenio Plan de Ayala (Fig. 3), it has certifications referring to the quality of its processes and, in 2021, obtained BONSUCRO certification for sustainable sugarcane production. Moreover, the population near Ingenio and authorities affirm that these certifications have not impacted visibly on improvements in the pollution emitted and social problems caused by the company (Quadratín SLP, 2018). Ingenio Plan de Ayala has certifications because of the quality of its processes. Also, in 2021, obtained BONSUCRO certification for the sustainable production of sugarcane, even if the population near Ingenio and authorities affirm that these certifications have not impacted visibly the pollution emitted and social problems caused by the company (Quadratín SLP, 2018).

The equipment used for monitoring was an AE33 aethalometer (Magee Scientific, Berkeley, U.S.A.) was installed inside Tecnológico Nacional de México - Campus Ciudad Valles (TecNM - Ciudad Valles), located at northwest of the city (22°01'19"N, 99°02'11"W). The sampling site is approximately one-kilometer northeast of Ingenio Plan de Ayala and is surrounded from northeast to west by sugarcane fields. Model AE33 aethalometer is a filter-based absorption photometer that measures seven wavelengths (370-950 nm). It continuously captures particles by drawing the aerosol-laden air stream through a spot on the filter tape. The analysis has done by measuring the light transmission through a portion of filter tape containing the sample versus the transmission through an unloaded tape portion that acts as a reference area (Drinovec et al., 2015). This equipment can differentiate BC from fossil fuels and biomass burning, which in this case will be very useful in explaining the proportion of contamination attributable to sugarcane and bagasse burning, which comes from the use of fuel oil in the agroindustrial process at the mill (Fig. 4a).



Fig. 4. Measuring equipment a) Aethalometer AE33 b) Mobile weather station Vantage Pro2.

Uncertainty calculation is a relevant factor to consider when measuring atmospheric pollutants such as BC, according to Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). In this case, was used the *Expanded Uncertainty* formula. Expanded Uncertainty is a measure that defines, around the result, an interval within which it can find a large part of the distribution of values that can attribute reasonably to the measurand. For this purpose, first, the Combined Uncertainty is calculated using Formula (1). Then finally, Expanded Uncertainty was determined with formula (2) (CEM, 2008). With the corresponding calculations, the uncertainty for this case was 0.016, which corresponds to the results obtained by Cuesta-Mosquera. (2020).

$$u_c = \sqrt{\sum_i [c_i \cdot u(x_i)]^2} \quad (1)$$

$$U = k u_c(y) \quad (2)$$

where: u_c = Combined Uncertainty, c_i = sensitivity coefficient, $u(x_i)$ = component uncertainty, U = Expanded Uncertainty, k = coverage factor, and y = factor.

In addition, a Vantage Pro2 mobile weather station had installed (Davis Instruments, Davis, USA) to obtain meteorological data from the site. The station can obtain continuous data in 15-minute intervals on wind direction and speed (anemometer), temperature (thermometer), relative humidity (hygrometer), atmospheric pressure (barometer), and precipitation (rain gauge), among others (Fig. 4b), of which hourly got averages subsequently.

RStudio, a free statistical and graphing software for the R programming language, was used for the data analysis. In addition, customized graphs were done with Openair (a

package developed to analyze air quality data) and other packages to show BC behavior during the analysis period. Finally, arc Map, version 10.2, was also used to graph pollutant concentration distribution to analyze the dispersion ranges and the different BC concentrations.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The BC monitoring started on November 13, 2020, and ended on June 7, 2021, covering the entire period of the 2020-2021 sugarcane harvest of the Ingenio Plan de Ayala. Additionally, it was monitored 20 days after the end of the harvest to have a period of concentrations to serve as a control. The Aethalometer AE33 software provided by Magee Scientific processed and classified more than 4,300 data in BC total, BC from fossil fuels, and BC from biomass burning.

The maximum daily average concentration of total BC was $2.2 \pm 0.035 \mu\text{g m}^{-3}$ however, some episodes exceeded $4.5 \pm 0.072 \mu\text{g m}^{-3}$. A fraction from fossil fuel burning exceeded $3.5 \pm 0.056 \mu\text{g m}^{-3}$, while that from biomass burning was $2.3 \pm 0.037 \mu\text{g m}^{-3}$. In 34.2% of cases, observations were higher than $1 \mu\text{g m}^{-3}$ and 12.9% higher than $1.4 \mu\text{g m}^{-3}$. The entire period average was $0.9 \mu\text{g m}^{-3}$. Also, the 95th percentile is 1.7, which implies that 95.0% of the observations reach up to $1.7 \mu\text{g m}^{-3}$.

Concentrations from fossil fuel burning (blue line) represented 62.9% of total concentrations (black line), compared to those from biomass burning (green line), which represented, on average, 37.1%. The proportion remains almost unchanged at all BC levels (Fig. 5). According to the Emissions Factors method, BC concentrations in a sugarcane area from biomass combustion should be much higher than those in oil derivatives.

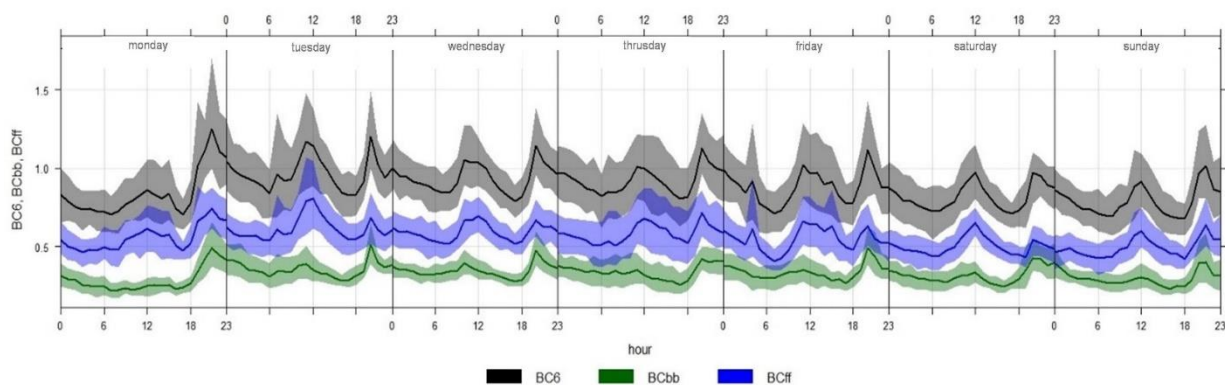


Fig. 5. Composition of BC concentrations.

Daily average concentrations showed a bell-shaped behavior, increasing during the months when the harvest was in full swing. On 74 occasions daily average exceeded $1 \mu\text{g m}^{-3}$ and on 22 occasions excelled at $1.4 \mu\text{g m}^{-3}$. As can be seen, December had the highest concentrations, exceeding the WHO reference 23 times. Furthermore, on the days following the harvest ended, the concentrations were reduced to near zero for several days (Table 1).

Table 1. Average daily BC concentrations.

Season	Month	Days	Averages		
			BC concentration ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Wind speed (km h^{-1})
Winter	Nov	18	0.8 ± 0.013	22.6	0.3
	Dec	31	1.1 ± 0.018	18.3	0.5
	Jan	31	0.9 ± 0.014	18.5	0.4
	Febr	28	0.9 ± 0.014	23.8	1.5
Spring	Mar	31	1.0 ± 0.016	27.4	2.1
	Apr	30	0.8 ± 0.013	31.1	ND
	May	18	0.6 ± 0.010	30.4	ND
No harvest	May-Jun	20	0.5 ± 0.010	30.7	ND

* ND = No data available

A Kolmogorov-Smirnov test proved the data do not fit a normal distribution ($p < .01$). Due to this reason, the Mann-Whitney U test, a non-parametric test that does not require a specific distribution to compare two sample means from the same population and test whether they are equal or not, was used (Ramírez-Ríos & Polack-Peña, 2020).

In this case, in the three types of BC detected (total, biomass, and fossil fuels), it was found that there is a statistically significant difference between the concentrations found in the harvest season and the non-harvest season ($\text{Pr} > |Z| < .0001$). Additionally, the previous results were supported with the Kruskal-Wallis test, obtaining a significant difference between the two groups of data ($\text{Pr} > \text{Chi-square} < .0001$) for all cases.

Concerning variation of concentrations between days of the week, concentration levels begin to increase on Mondays, reaching their peak on Tuesdays and then decreasing until Sunday by up 20.0%, even though the Ingenio Plan de Ayala protocols indicate that during harvest season, milling should be constant and by the availability of sugarcane.

As regards changes during the day, there are two peaks with subsequent drops. The first occurs at noon, after a prolonged drop near 20:00 hours. (Fig. 6); some possible explanations are related to times of more significant vehicular traffic because of sugarcane received or sugar shipped, as well as the beginning of processing shifts at the mill, where a more significant amount of fuel must probably be due to the machinery starting.

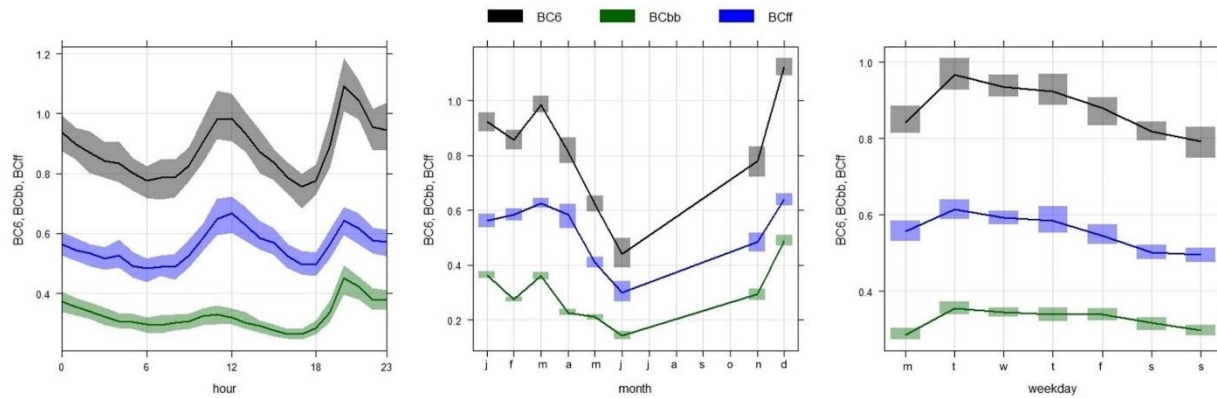


Fig. 6. Variation in BC concentrations by day and by hour.

In the graph, $1 \mu\text{g m}^{-3}$ was established as the limit since it is the WHO reference for increasing the risk of premature death due to prolonged exposure to BC. During November, December, and January, the highest concentrations occurred between 18:00 and 23:00 hours, while from February to May, they occurred between 10:00 and 14:00 hours. Concentrations are considerably lower at the beginning and end of the harvest. The lowest concentrations of the entire period were during June, when the harvest had already concluded (Fig. 7). A relevant fact is that nearly the entire December concentrations exceeded $1 \mu\text{g m}^{-3}$, becoming the most polluted month.

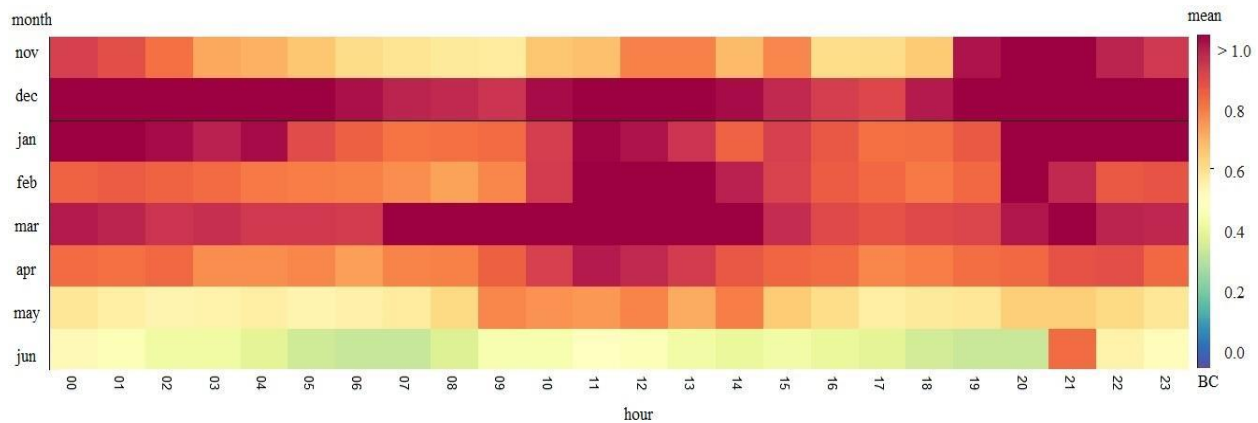


Fig. 7. Variation in BC concentrations by hour, during the monitoring months.

The highest concentrations occurred at low wind speeds, so a large part of the emissions must remain and be deposited in the surrounding areas where they are generated. Joining the distribution BC concentrations graph with the map of Ciudad Valles is possible to observe that the highest concentrations are found in the location of Ingenio Plan de Ayala and its surroundings, as well as to the north and northwest of the sampling point where there is a large area cultivated with sugarcane (Fig. 8).

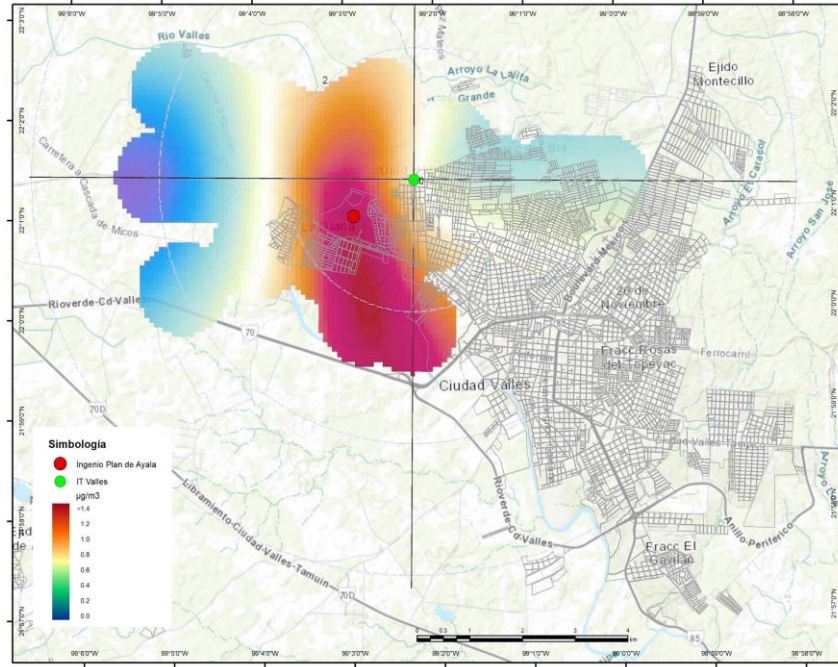


Fig. 8. Spatial distribution of BC concentrations.

These results are consistent with trajectory models obtained from Global Data Assimilation System data of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), which show no substantial variations in wind trajectories at different times of the day or between the months of the year. Furthermore, up to 87.0% of the winds come from the Gulf of Mexico. Therefore, it implies that the predominant winds blow from west to east. Still, when they meet the Sierra Madre Oriental, a natural barrier that delimits the Huasteca Potosina, an essential fraction of the particles they contain are deposited in this zone (Fig. 9).

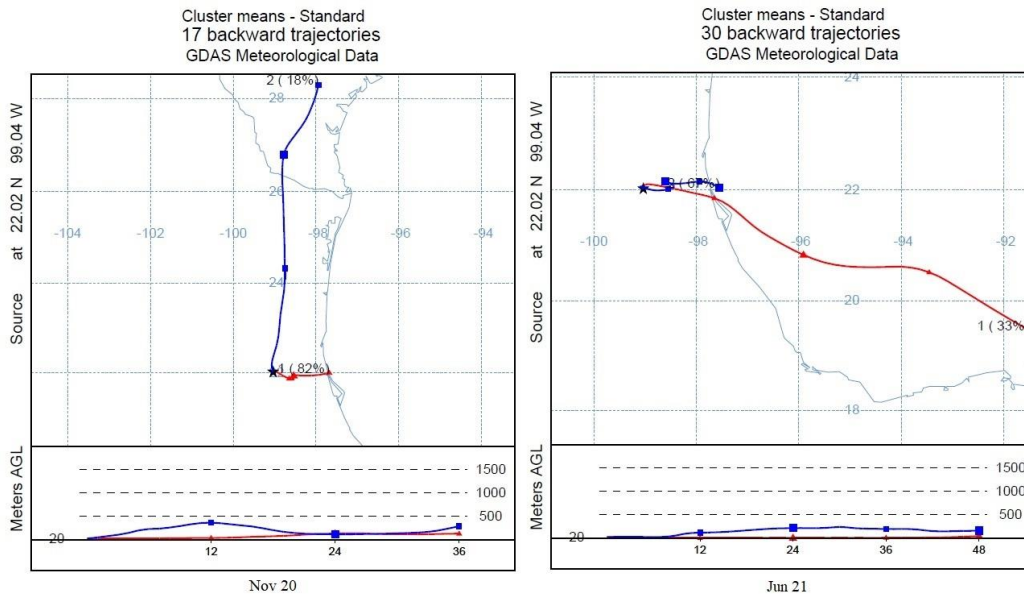


Fig. 9. Monthly Provenance paths of winds. November 2020 (left), June 2021 (right).

On this matter, during the sugarcane harvest season, the naked eye can see the smoke generated by the burning of the sugarcane fields and the sugar mill (Fig. 10). Moreover, the deposition of black dust (BC) is present on the surfaces of houses and vehicles in much of the city. As a result, many people feel discomfort in the respiratory tract.



Fig. 10. BC emissions produced by sugarcane sector in Ciudad Valles.
a) Cane fields b) Sugarmill.

Sugarcane is one of the most important economic activities in Ciudad Valles and other municipalities of the Huasteca Potosina that depend heavily on it. However, despite its economic and social importance, since decades ago, it has been facing severe problems

that threaten the sustainability of the activity. Although for several years, it remained the main crop in San Luis Potosí, recently, some more profitable products have become uppermost, displacing sugarcane. Currently, it ranks fourth in cultivated area, with 11.5% of the agricultural area, and second in production value, with 17.3% of the agricultural income generated.

Notwithstanding, the sector has managed to maintain its importance due to the addition of surfaces to production areas, which has necessarily implied massive land clearing (SIAP, 2022). Nevertheless, on the other hand, it has serious problems of low and decreasing productivity, and dependence on rainfall since only 22.3% of sugarcane land has an irrigation system (CONADESUCA, 2022).

On the other hand, the sugarcane sector's production and industrialization process lead to activities involving the combustion of both biomass and fossil fuels. For this reason, BC concentrations can increase to more than double during the sugarcane harvest season, causing severe environmental, productive, and human health effects, among others.

In Ciudad Valles, hourly mean concentrations for the entire period were $0.9 \pm 0.014 \mu\text{g m}^{-3}$, with episodes exceeding $4.5 \pm 0.072 \mu\text{g m}^{-3}$. During one-third of the sampling time, concentrations exceeded the WHO guidelines ($1.0 \mu\text{g m}^{-3}$) for increases in human mortality from prolonged exposure to BC. This fact is grave for the population of Ciudad Valles (180,000 inhabitants) and surrounding communities since they are exposed to BC and other air pollutants emitted during the harvest six months yearly.

In addition, emissions from this sector could have a direct relationship with sugarcane production. That is because both productive and industrial systems involve several activities with fossil fuels and biomass combustion.

Considering that sugarcane milled by Ingenio Plan de Ayala has increased by 42.3% over the last 15 years, it is foreseeable that concentrations to which the population is exposed have also increased. Furthermore, as mentioned, the environment is affected, as well as agriculture itself, since part of BC is deposited on the crops, reducing the sunlight they receive and thus their productivity.

Concerning the BC composition, there was an unexpected result since, according to CONADESUCA figures, during the 2020-2021 harvest, Ingenio Plan de Ayala did not use petroleum in its processes. Nevertheless, the aethalometer data are conclusive and consistent: concentrations from fossil fuel combustion represent two-thirds of the total BC found. Furthermore, other temporal variations indicate that processing patterns decrease concentration during weekends and at night, although this may also be related to other social or natural factors. What is a fact is, during the cold months, the highest concentrations were in the evenings, between 18:00 and 23:00 hours. On the other side, during the warm months, they were in the mornings, between 9:00 and 13:00 hours.

The wind speed was low (average of 0.6 km h^{-1}) during the monitoring. This fact in addition to the high humidity (80.0%) triggers the scarce BC dispersion; in other words, a large part of the contamination remains where it was emitted. That is why the Hysplit model

indicated the highest concentrations are distributed mainly around Ingenio Plan de Ayala and to the north-northwest of TecNM - Ciudad Valles, where the sugarcane area is.

Likewise, a decrease in BC concentrations practically until zero was detected when the harvest ended (there is a statistical difference during harvest and non-harvest seasons). So, it is very likely that they are directly related to emissions from the factory and the sugarcane growing area in the region, and that Ingenio Plan de Ayala continues to use fuel oil as fuel, in addition to not using filters.

Despite the limitations that this research contains, it is an important antecedent for future works of greater depth, time, and completeness, which include complimentary techniques such as scanning microscopy to corroborate the composition of the particles, as well as PM monitoring.

BC is the leading indicator of air quality (Janssen et al., 2011) since its emission is associated with those other air pollutants that are highly toxic to humans and environmental contaminants. Therefore, although the evaluation of BC concentrations is the focus of this study, it has been found that, at the same time, a significant amount of air pollutants is emitted by the sugarcane sector, mainly in the harvest season.

In addition, the burning of agricultural residues is a widespread practice throughout Mexico and many countries in the world, especially in grain-producing crops such as corn, rice, sorghum, and wheat, among others (Santiago-De la Rosa et al., 2017). That is why the problem of air pollution from agricultural activities is not limited to sugarcane areas but many other agricultural lands. Despite this, until now, it has not been awarded the corresponding importance, which is why the data from direct monitoring in areas where agricultural burning is scarce and temporary.

The weak environmental legislation in Mexico is only limited to a draft standard to regulate emissions from sugar mills, without being consolidated from 2017 to date. Regarding agricultural burnings, producers only need to follow a regulation to elaborate guardrails to prevent the fire from spreading uncontrolled and notify Environmental Ministry to be able to carry them out.

Despite its economic and social relevance, the sugarcane sector activities adversely affect the local population and the global environment. The sugarcane sector emissions also affect the BC reduction goals of 51% to 2030, signed by Mexico in COP21. That is because it is crucial to establish accurate air quality monitoring systems that provide information to implement fairer agricultural policies according to reality to sanction those responsible for the effects and even inhibit the activities that produce such contamination.

4. CONCLUSIONS

The BC concentrations found in this research show that contamination generated during the harvest season can be equal to or higher than those reported in the largest cities in Mexico, despite Ciudad Valles having less than 200,000 inhabitants. Furthermore, these

concentrations are high enough to increase the risk of disease and premature death in the exposed population and cause harmful environmental and productive impacts.

The results showed that concentrations are significantly higher during the sugarcane harvesting season than during the rest of the year, so there are elements to think that this sector is the growth generator. Additionally, the highest concentrations were between the sugar mill and cultivation areas, reaffirming the previous idea.

There have been efforts to measure and evaluate air pollutants in San Luis Potosí. Still, the time and the contaminants monitored have yielded valuable but limited results to establish better control strategies and improve air quality. Therefore, it is highly desirable to continue research related to these issues, extending the time and resources used, such as a more significant amount of equipment and the use of technologies such as geographic information systems and remote sensing to expand and improve the information generated.

In this regard, as it is known, the reduction of BC emissions is an effective measure to reduce global warming and improve the health of the exposed population. The sugarcane sector could contribute to this reduction with actions such as green harvesting and the installation of filters in the chimneys of sugar mills. It is possible to quantify these improvements with the implementation of monitoring systems. This is fundamental to aspiring the agricultural sector to reduce their emissions and contributes to achieving the goals proposed by México for The 2030 Agenda for Sustainable Development concerning emissions reduction.

5. REFERENCES

- Abdullah, N. A., Latif, M. T., Juneng, L., Uning, R., Hassan, H., Azhari, A., Tuch, T., & Wiedensohler, A. (2022). Aerosol particle properties at a remote tropical rainforest in Borneo. *Atmospheric Pollution Research*, 13(4), 101383. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101383>
- Ahmed, T., Dutkiewicz, V. A., Shareef, A., Tuncel, G., Tuncel, S., & Husain, L. (2009). Measurement of black carbon (BC) by an optical method and a thermal-optical method: Intercomparison for four sites. *Atmospheric Environment*, 43(40), 6305–6311. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.09.031>
- Beta San Miguel. (2016, August 8). *San Miguel del Naranjo*. BSM Beta San Miguel. Retrieved April 21, 2022, from <https://www.bsm.com.mx/naranjo.html>
- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, 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>

- Bové, H., Bongaerts, E., Slenders, E., Bijmens, E. M., Saenen, N. D., Gyselaers, W., Van Eyken, P., Plusquin, M., Roeffaers, M. B. J., Ameloot, M., & Nawrot, T. S. (2019, September 17). Ambient black carbon particles reach the fetal side of human placenta. *Nature Communications*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11654-3>
- Burroughs Peña, M. S., & Rollins, A. (2017, February). Environmental Exposures and Cardiovascular Disease. *Cardiology Clinics*, 35(1), 71–86. <https://doi.org/10.1016/j.ccl.2016.09.001>
- Casares Long, J. J., Longhurst, J. W. S., & Barnes, J. (2020). *Air Pollution XXVIII (Wit Transactions on Ecology and the Environment, Vol 244)*: 28. WIT Press / Computational Mechanics.
- Centro Español de Metrología (CEM). (2008). *Evaluación de datos de medición. Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida* (1st ed.). Madrid, España. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.cem.es/sites/default/files/gum20digital1202010_0.pdf
- Chaudhuri, I., Frujtier-Pölloth, C., Ngiewih, Y., & Levy, L. (2017, November 2). 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/10.1080/10408444.2017.1391746>
- Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA). (2021, October). *Informe Estadístico del Sector Agroindustrial de la Caña de Azúcar en México Zafra 2011–2012 / 2020–2021* (No. 8). <https://siiba.conadesuca.gob.mx/infocana/informe/informe.html>
- Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA). (2022). *Reportes*. Sistema Sinfocaña. Retrieved December 15, 2021, from <https://www.gob.mx/conadesuca/acciones-y-programas/sistema-infocana>
- Cremer, R. S., Tunved, P., & Ström, J. (2022). Airmass Analysis of Size-Resolved Black Carbon Particles Observed in the Arctic Based on Cluster Analysis. *Atmosphere*, 13(5), 648. <https://doi.org/10.3390/atmos13050648>
- Cuesta-Mosquera, A., Močnik, G., Drinovec, L., Müller, T., Pfeifer, S., Minguillón, M. C., Björn, B., Buckley, P., Dudoitis, V., Fernández-García, J., Fernández-Amado, M., Ferreira De Brito, J., Flentje, H., Heffernan, E., Kalivitis, N., Kalogridis, A. C., Keernik, H., Marmureanu, L., Luoma, K., . . . Wiedensohler, A. (2020, August 28). Intercomparison and characterization of 23 Aethalometers under laboratory and ambient air conditions: Procedures and unit-to-unit variabilities. *Atmospheric Measurement Techniques*. <https://doi.org/10.5194/amt-2020-344>
- Cueto-Delgadillo, A. (2021). *Evaluación de carbono negro en la zona sur de San Luis Potosí en el año 2020* [Tesis de licenciatura]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

- Drinovec, L., Močnik, G., Zotter, P., Prévôt, A. S. H., Ruckstuhl, C., Coz, E., Rupakheti, M., Sciare, J., Müller, T., Wiedensohler, A., & Hansen, A. D. A. (2015). The "dual-spot" Aethalometer: an improved measurement of aerosol black carbon with real-time loading compensation. *Atmospheric Measurement Techniques*, 8(5), 1965–1979. <https://doi.org/10.5194/amt-8-1965-2015>
- Dumka, U., Kaskaoutis, D., Tiwari, S., Safai, P., Attri, S., Soni, V., Singh, N., & Mihalopoulos, N. (2018). Assessment of biomass burning and fossil fuel contribution to black carbon concentrations in Delhi during winter. *Atmospheric Environment*, 194, 93–109. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.033>
- Gobierno de Aragón. (2022, August 4). *El cambio climático*. Portal de Aragon. Retrieved July 15, 2022, from <https://www.aragon.es/-/el-cambio-climatico#:~:text=La%20temperatura%20del%20planeta%20sube%3a%20es%20el%20calentamiento%20global,-Las%20temperaturas%20de&text=En%20los%20%C3%BAltimos%20100%20a%C3%B1os,e%20%C3%81rtico%2C%20hasta%205%20%C2%BAC>
- Gonçalves JR, S. J., Magalhães, N., Charello, R. C., Evangelista, H., & Godoi, R. H. (2022). Relative contributions of fossil fuel and biomass burning sources to black carbon aerosol on the Southern Atlantic Ocean Coast and King George Island (Antarctic Peninsula). *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 94(suppl 1). <https://doi.org/10.1590/0001-376520220210805>
- Grupo PIASA. (2019, April 30). *Ingenio Plan de San Luis*. Retrieved April 21, 2022, from <https://grupopiasa.com/site/index.php/u-o-perativas/ingenio-plan-de-san-luis>
- Hedmer, M., Lovén, K., Martinsson, J., Messing, M. E., Gudmundsson, A., & Pagels, J. (2022). Real-Time Emission and Exposure Measurements of Multi-walled Carbon Nanotubes during Production, Power Sawing, and Testing of Epoxy-Based Nanocomposites. *Annals of Work Exposures and Health*. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxac015>
- Ingenios Santos. (2020, February 18). *Unidades Estratégicas*. Retrieved April 21, 2022, from <https://www.santos.com.mx/>
- Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME) & World Bank (WB). (2016). *The Cost of Air Pollution*. World Bank Group, IHME.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2016). *Políticas de mitigación de contaminantes climáticos de vida corta Perspectivas desde México sobre la implementación Mitigación de Carbono Negro* [En línea]. https://www.inecc.gob.mx/dialogos/dialogos1/images/documentos/Dialogo6/Abraham_Residuos.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2021). *Censo de Población y Vivienda* (Version 2020) [Dataset]. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/default.html>

- 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>
- Janssen, N. A., Hoek, G., Simic-Lawson, M., Fischer, P., van Bree, L., ten Brink, H., Keuken, M., Atkinson, R. W., Anderson, H. R., Brunekreef, B., & Cassee, F. R. (2011, December). Black Carbon as an Additional Indicator of the Adverse Health Effects of Airborne Particles Compared with PM₁₀ and PM_{2.5}. *Environmental Health Perspectives*, 119(12), 1691–1699. <https://doi.org/10.1289/ehp.1003369>
- Janssen, N. A. H., World Health Organization. Regional Office for Europe, & Weltgesundheitsorganisation Regionalbüro für Europa. (2012). *Health Effects of Black Carbon*. World Health Organization, Regional Office for Europe.
- Jin, H. W., Hu, R. Z., Pin-hua, X., & Ping, L. (2021). Synchronous detection of multiple optical characteristics of atmospheric aerosol by coupled photoacoustic cavity. *Chinese Physics B*. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/ac43ad>
- Kalbermatter, D. M., Močnik, G., Drinovec, L., Visser, B., Röhrbein, J., Oscity, M., Weingartner, E., Hyvärinen, A. P., & Vasilatou, K. (2022). Comparing black-carbon- and aerosol-absorption-measuring instruments – a new system using lab-generated soot coated with controlled amounts of secondary organic matter. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15(2), 561–572. <https://doi.org/10.5194/amt-15-561-2022>
- Kouassi, A. A., Doumbia, M., Silue, S., Yao, E. M., Dajuma, A., Adon, M., Touré, N. E., & Yoboue, V. (2021). Measurement of Atmospheric Black Carbon Concentration in Rural and Urban Environments: Cases of Lamto and Abidjan. *Journal of Environmental Protection*, 12(11), 855–872. <https://doi.org/10.4236/jep.2021.1211050>
- Li, A. F., Zhang, K. M., Allen, G., Zhang, S., Yang, B., Gu, J., Hashad, K., Sward, J., Felton, D., & Rattigan, O. (2022). Ambient sampling of real-world residential wood combustion plumes. *Journal of the Air & Waste Management Association*. <https://doi.org/10.1080/10962247.2022.2044410>
- Liu, X., Zheng, M., Liu, Y., Jin, Y., Liu, J., Zhang, B., Yang, X., Wu, Y., Zhang, T., Xiang, Y., Liu, B., & Yan, C. (2022). Intercomparison of equivalent black carbon (eBC) and elemental carbon (EC) concentrations with three-year continuous measurement in Beijing, China. *Environmental Research*, 209, 112791. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112791>
- Minderytė, A., Pauraitė, J., Dudoitis, V., Plauškaitė, K., Kilikevičius, A., Matijošius, J., Rimkus, A., Kilikevičienė, K., Vainorius, D., & Byčenkienė, S. (2022). Carbonaceous aerosol source apportionment and assessment of transport-related pollution. *Atmospheric Environment*, 279, 119043. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119043>

- Mordukhovich, I., Wilker, E., Suh, H., Wright, R., Sparrow, D., Vokonas, P. S., & Schwartz, J. (2009, November). Black Carbon Exposure, Oxidative Stress Genes, and Blood Pressure in a Repeated-Measures Study. *Environmental Health Perspectives*, 117(11), 1767–1772. <https://doi.org/10.1289/ehp.0900591>
- 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. (2018b, November). Sugarcane burning emissions: Characterization and emission factors. *Atmospheric Environment*, 193, 262–272. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.013>
- Pandey, C. P., & Negi, P. S. (2022). Characteristics of equivalent black carbon aerosols over Doon Valley in NW Indian Himalaya during COVID-19 lockdown 2020. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(3). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09879-9>
- Paunescu, A. C., Casas, M., Ferrero, A., Pañella, P., Bougas, N., Beydon, N., Just, J., Lezmi, G., Sunyer, J., Ballester, F., & Momas, I. (2019, October). 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>
- Peralta, O., Ortíz-Alvarez, A., Basaldud, R., Santiago, N., Alvarez-Ospina, H., de la Cruz, K., Barrera, V., de la Luz Espinosa, M., Saavedra, I., Castro, T., Martínez-Arroyo, A., Páramo, V. H., Ruíz-Suárez, L. G., Vazquez-Galvez, F. A., & Gavilán, A. (2019). Atmospheric black carbon concentrations in Mexico. *Atmospheric Research*, 230, 104626. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104626>
- Quadratín SLP. (2018, December 25). *Provoca cáncer Ingenio Plan de Ayala en Valles: funcionario municipal* [Press release]. <https://sanluispotosi.quadratín.com.mx/san-luis-potosi/provoca-cancer-ingenio-plan-de-ayala-en-valles-funcionario-municipal/>
- Quintana-Quintalán, O. M. (2021, March). *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.
- Ramírez-Ríos, A., & Polack-Peña, A. M. (2020). Estadística inferencial. Elección de una prueba estadística no paramétrica en investigación científica. *Horizonte de La Ciencia*, 10(19). <https://doi.org/10.26490/uncp.horizonteciencia.2020.19.597>
- Rawat, P., Sharma, B., Dey, S., Rana, A., Mukherjee, A., Polana, A. J., Mao, J., Jia, S., Yadav, A. K., Khillare, P. S., & Sarkar, S. (2022). Are fireworks a significant episodic source of brown carbon? *Environmental Science and Pollution Research*, 29(26), 40252–40261. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20183-4>

- Santiago-De la Rosa, N., Mugica-Álvarez, V., Cereceda-Balic, F., Guerrero, F., Yáñez, K., & Lapuerta, M. (2017, September 9). 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>
- Sharma, K., Ranjan, R. K., Lohar, S., Sharma, J., Rajak, R., Gupta, A., Prakash, A., & Pandey, A. K. (2022). Black Carbon Concentration during Spring Season at High Altitude Urban Center in Eastern Himalayan Region of India. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 16(1), 100–112. <https://doi.org/10.5572/ajae.2021.149>
- Singh, A., Rajput, P., Sharma, D., Sarin, M. M., & Singh, D. (2014). Black Carbon and Elemental Carbon from Postharvest Agricultural-Waste Burning Emissions in the Indo-Gangetic Plain. *Advances in Meteorology*, 2014, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2014/179301>
- Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). (2022). *Producción Agrícola*. Cierre de la producción agrícola. Retrieved July 8, 2022, from <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Slowik, J. G., Cross, E. S., Han, J. H., Davidovits, P., Onasch, T. B., Jayne, J. T., Williams, L. R., Canagaratna, M. R., Worsnop, D. R., Chakrabarty, R. K., Moosmüller, H., Arnott, W. P., Schwarz, J. P., Gao, R. S., Fahey, D. W., Kok, G. L., & Petzold, A. (2007). An Inter-Comparison of Instruments Measuring Black Carbon Content of Soot Particles. *Aerosol Science and Technology*, 41(3), 295–314. <https://doi.org/10.1080/02786820701197078>
- Srivastava, P., Naja, M., Seshadri, T. R., Joshi, H., Dumka, U. C., Gogoi, M. M., & Babu, S. S. (2021). Implications of Site-specific Mass Absorption Cross-section (MAC) to Black Carbon Observations at a High-altitude Site in the Central Himalaya. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 58(1), 83–96. <https://doi.org/10.1007/s13143-021-00241-6>
- Suárez, L., Torres, C., Helmig, D., & Hueber, J. (2017). Medición y análisis del aerosol de carbono negro en el observatorio de Huancayo, Perú. *Revista Boliviana de Física*, 30, 7–15. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&p_id=S1562-38232017000100003&lng=en&tlng=es
- Tobias, A., Karanasiou, A., Reche, C., Amato, F., Alastuey, A., & Querol, X. (2014). Efectos del carbón negro sobre la salud respiratoria en la ciudad de Barcelona. *European Respiratory Journal*, 44, 2923. https://erj.ersjournals.com/content/44/Suppl_58/2923.short
- United Nations (UN). (2022, September 9). *Pollution and climate change upsurge the risk of “climate penalty”*. UN News. Retrieved September 26, 2022, from <https://news.un.org/en/story/2022/09/1126141>
- World Health organization (WHO). (2013). *Health effects of particulate matter. Policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia*.

<https://pm10.kormany.hu/download/1/e6/80000/Health-effects-of-particulate-matter-final-Eng.pdf>

- Yan, Q., Kong, S., Yan, Y., Liu, X., Zheng, S., Qin, S., Wu, F., Niu, Z., Zheng, H., Cheng, Y., Zeng, X., Wu, J., Yao, L., Liu, D., & Qi, S. (2022). Hourly emission estimation of black carbon and brown carbon absorption from domestic coal burning in China. *Science of The Total Environment*, 814, 151950. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151950>
- Yong, M., Anderle, L., Levy, L., & McCunney, R. J. (2019, November). Carbon Black and Lung Cancer Mortality—A Meta-regression Analysis Based on Three Occupational Cohort Studies. *Journal of Occupational & Environmental Medicine*, 61(11), 949–00. <https://doi.org/10.1097/jom.0000000000001713>
- Zapata Ramírez, J. D. (2022). *Evaluación de Carbono Negro en la zona norte de la ciudad de San Luis Potosí durante los años 2018-2019* [Tesis de licenciatura]. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

V. EVALUACIÓN DEL CARBONO NEGRO EN LA ZONA CAÑERA DE SAN LUIS POTOSÍ MEDIANTE EL USO DE TECNOLOGÍA SATELITAL Y SU USO PARA LA PROPUESTA DE UN ÍNDICE DE CALIDAD AMBIENTAL

ASSESSMENT OF BLACK CARBON IN THE SUGARCANE AREA OF SAN LUIS POTOSÍ USING SATELLITE TECHNOLOGY AND ITS USE FOR THE PROPOSAL OF AN ENVIRONMENTAL QUALITY INDEX

RESUMEN

El monitoreo ambiental y su uso para la creación de índices de calidad ambiental son técnicas que desde hace algunos años se utilizan para conocer el impacto que las actividades antropogénicas o naturales tienen sobre el ambiente. El uso de la tecnología satelital ha coadyuvado en el uso de estas metodologías, ampliando su alcance espacial y haciéndolas más asequibles, precisas y oportunas. El objetivo de esta investigación fue monitorear con tecnología satelital las concentraciones de carbono negro en la zona cañera de San Luis Potosí durante la zafra 2021-2022 y proponer un índice de calidad ambiental que, además de este contaminante, incluya otras variables afectadas por el sector cañero azucarero. Con el análisis se observó que la calidad ambiental disminuye durante la época de zafra y se recomienda continuar experimentando con más variables y ampliar el periodo de análisis.

Palabras-clave: Afectaciones, salud, recursos, local, global.

ABSTRACT

Environmental monitoring and its use for the creation of environmental quality indexes are techniques that have been used for some years to determine the impact that anthropogenic or natural activities have on the environment. The use of satellite technology has contributed to the use of these methodologies, expanding their spatial scope and making them more affordable, accurate and timely. The objective of this research was to monitor, with satellite technology, the concentrations of black carbon in the sugarcane area of San Luis Potosí during the 2021-2022 harvest and to propose an environmental quality index that, in addition to this pollutant, includes other variables affected by the sugarcane sector. The analysis showed that environmental quality decreases during the sugarcane harvest season and it is recommended to continue experimenting with more variables and extend the analysis period.

Keyword: Afectations, health, resources, local, global.

1. INTRODUCCIÓN

El monitoreo ambiental es la acción de tomar lecturas, medidas y evaluaciones de variables físicas, químicas y/o biológicas, en un periodo determinado de tiempo a fin de conocer tanto los cambios, como el seguimiento del estado ambiental, así como el grado de conservación que tienen los recursos naturales en una zona geográfica. Además, es la clave para la gestión ambiental, ya que genera información que permite planear la implementación de medidas que limiten, atenúen o eviten el deterioro ambiental, y apoyar en el establecimiento y seguimiento de programas, normas, planes y proyectos para los procesos productivos (Yañez Narvaez, 2022).

Se realiza tradicionalmente de forma directa, mediante un limitado número de unidades sensoras caras y la validez espacial de sus resultados es limitada (Oliveira y Rodrigues, 2011). Su objetivo principal es identificar a los responsables de las alteraciones ambientales para su supervisión, fiscalización y sanción, acordes al nivel de afectación que se les atribuya (OEFA, 2017).

El monitoreo se realiza principalmente en las grandes ciudades donde se considera que se genera más contaminación y se concentra la mayor importancia social y económica (SEMARNAT, 2018). Es por ello que, se dejan de lado las zonas rurales, ya que, comúnmente se cree que sus actividades son de bajo impacto ambiental. Sin embargo, varias actividades relacionadas con el sector agropecuario y agroindustrial, utilizan de forma intensiva los recursos naturales y los contaminan, afectando al ambiente y la salud humana (Ruiz-Villavicencio et al., 2020).

Otra de las complicaciones que surgen cuando se trata de monitorear zonas rurales son las extensas superficies que éstas comprenden. Al respecto, el desarrollo tecnológico avanzado mucho en las últimas décadas, permitiendo que actualmente se pueda realizar el monitoreo de la contaminación y otras características de la superficie terrestre, en grandes superficies y con costos reducidos, a través del uso de la tecnología satelital. Aunado a ello, se ha avanzado en la creación de índices que, mediante la inclusión de varias variables, estiman la calidad ambiental y sus variaciones espaciotemporales (Dobbie y Dail, 2014; SkyWatch, 2022).

No obstante, estos índices también se han enfocado en muchos a la salud humana y no a las múltiples afectaciones de las actividades antropogénicas, como el sector cañero azucarero. El objetivo del presente artículo es evaluar la concentración de carbono negro en la zona cañera de San Luis Potosí, durante la zafra 2021-2022, y hacer una comparación con las concentraciones en los meses posteriores a la culminación de la zafra. Asimismo, se propone un índice de calidad ambiental, utilizando, además del carbono negro, variables que se ven afectadas por la cosecha e industrialización de la caña de azúcar y que además de afectar a la salud humana, también dañan los suelos, la agricultura y en general, el ambiente local y el global.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

La zona cañera de San Luis Potosí se extiende a más de 90 mil hectáreas en la región huasteca del estado y produce casi 5 millones de toneladas de caña de azúcar anualmente (CONADESUCA, 2022). El total de la producción se procesa en los cuatro ingenios establecidos en la entidad: Plan de Ayala, ubicado en la cabecera municipal de Ciudad Valles; Plan de San Luis, situado en la comunidad de La Hincada del municipio de Ciudad Valles; Alianza Popular, establecido en la comunidad de Tambaca, municipio de Tamasopo y San Miguel del Naranjo, que se encuentra en la cabecera del municipio de El Naranjo (Figura 1).

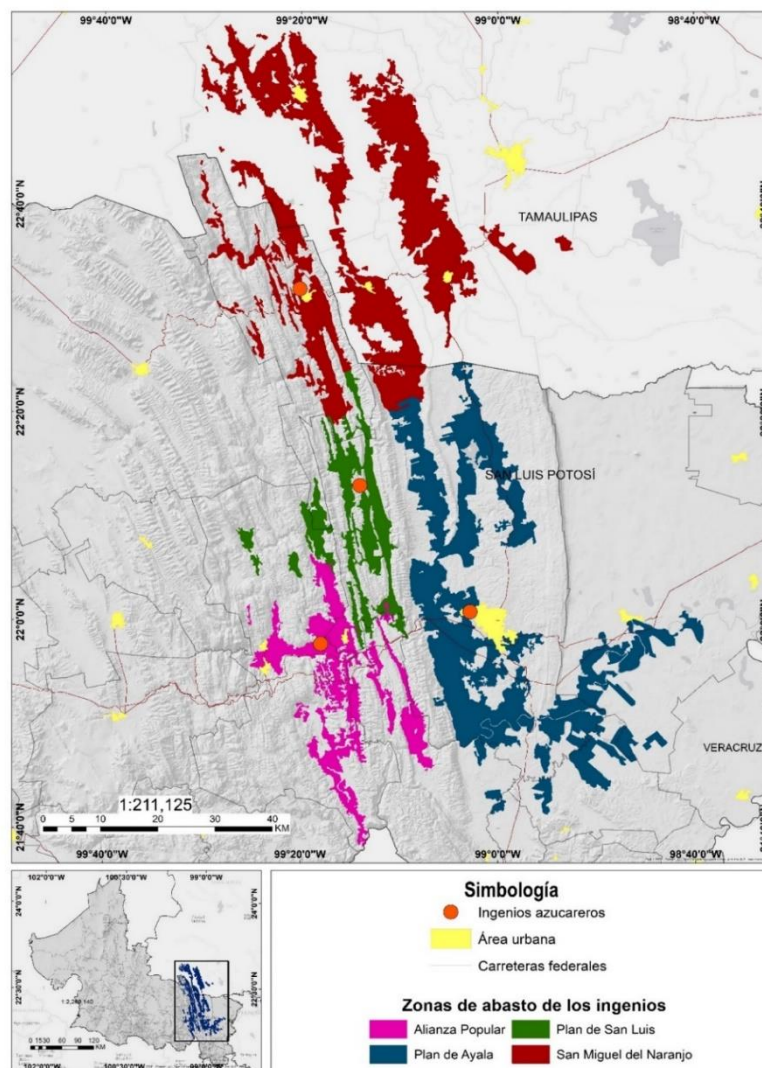


Figura 1. Ingenios azucareros de San Luis Potosí y sus zonas de abasto.

Fuente: Elaboración propia.

2.2. Metodología

La zafra o periodo de cosecha e industrialización de la caña de azúcar es un periodo que abarca aproximadamente seis meses de cada año. Durante este tiempo, se suscitan actividades de alto impacto ambiental, desde la quema de los cañaverales durante la cosecha, hasta la combustión de biomasa y combustibles fósiles por los ingenios azucareros. Además, se genera un importante afluente de vehículos de carga pesada que transporta la caña de los predios a los ingenios y posteriormente, el azúcar a los puntos de venta.

La zafra 2021-2022 en el estado de San Luis Potosí, comenzó el 7 de noviembre de 2021 con el arranque de operaciones del Ingenio Plan de Ayala y culminó el 15 de junio de 2022 con el fin de la molienda de este mismo ingenio. No obstante, Alianza Popular comenzó oficialmente la zafra el 20 de noviembre; Plan de San Luis, el 25 de noviembre y San Miguel del Naranjo, el 30 de noviembre, del mismo año. Por esta razón, se considera que la zafra al pleno de capacidad ocurrió entre los meses de diciembre de 2021 y junio de 2022 (CONADESUCA, 2022). Por lo anterior, el análisis de la presente investigación se realizó para los meses de diciembre de 2021 a octubre de 2022, abarcando los meses que se prolongó la zafra, más tres meses posteriores a la culminación de esta, para analizar la variación entre ambos periodos.

Uno de los principales contaminantes del aire que se genera durante la zafra de la caña de azúcar es el carbono negro (BC), un contaminante climático de vida corta, capaz de absorber la luz solar, retenerla y transformarla en calor, que se origina por la combustión ineficiente e incompleta de biomasa y combustibles fósiles. Por sus características, se considera el segundo agente más potente de cambio climático, con un potencial de calentamiento equivalente al 55% del atribuido al dióxido de carbono (CO₂) (Liu et al., 2022).

Adicionalmente, la exposición directa al BC está asociada a daños en la salud humana por paros e insuficiencia cardíacos (Burroughs-Peña & Rollins, 2018), derrames sanguíneos (Mordukhovich et al., 2009); cáncer de pulmón (Yong et al., 2019), bronquitis crónica, asma y enfisema (Paunescu et al., 2019); bajo peso al nacer (Bové et al., 2019); así como a deshidratación grave, disfunción renal aguda y genotoxicidad (Chaudhuri et al., 2017). Dada la asociación de sus emisiones con otros contaminantes altamente nocivos, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), también se considera al BC como el principal indicador de la calidad del aire en la salud humana (Casares-Long, Longhurst y Barnes, 2020).

Al ser uno de los principales indicadores ambientales y de salud humana, su monitoreo es de suma importancia. Con este fin, se descargaron y procesaron las concentraciones de BC contenidas en las colecciones de datos de los productos MERRA-2, en los portales web: GIOVANNI (NASA, 2021a) y MDISC (NASA; 2021b) manejado por Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC).

La variable utilizada fue Black Carbon Surface Mass Concentration del producto M2T1NXAER v5.12.4, que es una recopilación de datos bidimensionales promediados

en el tiempo, con una marca de tiempo con la hora central de una hora a partir de las 00:30 UTC. Las imágenes están disponibles a partir de 1980 y hasta tres semanas antes de la fecha de acceso. Este producto utiliza observaciones satelitales basadas en RETRO-2 (Reanalysis of the Tropospheric Chemical Composition, versión 2) y contiene un diagnóstico de aerosoles asimilados (extendidos) a 550 nanómetros (nm). La resolución espacial es de $0.5 \times 0.625^\circ$ (aproximadamente 55.5×69.4 kilómetros (km)), las concentraciones están dadas en kilogramos por metro cúbico (kg m^{-3}), y las imágenes se descargan en formato NetCDF (GMAO, 2015).

El procesamiento de la información se realizó con el software ArcMap versión 10.5, y consistió en la extracción e importación de datos; así como su conversión a formato ráster. Asimismo, se escalaron las unidades de las imágenes para elevarlas a microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g m}^{-3}$), y se aplicó un remuestreo utilizando la interpolación del vecino más cercano propuesta en CDO User Guide Climate Data Operator (CDO) Version 1.9.6, cuyo enfoque de muestreo es factible y adoptado en estudios de validación (Ma et al., 2021).

Finalmente, se extrajo la información con el padrón actualizado de la zona cañera del estado de San Luis Potosí y se clasificó en intervalos de $0.2 \mu\text{g m}^{-3}$, estableciendo como límite superior las concentraciones $>1.0 \mu\text{g m}^{-3}$, el cual es un referente de la Organización Mundial de la Salud (OMS), para efectos negativos en la salud humana por exposición directa a este contaminante (Janssen et al., 2012).

De forma complementaria, se realizó un análisis espectral para la extracción del comportamiento temporal por ingenio azucarero a través del valor del píxel para las concentraciones de BC, mediante una malla con dimensiones de $27 \times 27 \text{ km}$ (729 km^2), con la estructura de un cubo de datos. Para ello, se ubicaron y seleccionaron los píxeles de las imágenes que corresponden geográficamente con áreas de hasta 2 kilómetros de distancia de los ingenios azucareros (nube de puntos).

Para la representación georreferenciada en 2D de las imágenes, se utilizó el software Panoply versión 5.2.3 (NASA, 2022). Se desplegaron las variables seleccionadas a manera de imagen y de varios arreglos por píxel y temporalidad, los cuales se exportaron a una base de datos.

No obstante, y aunque la emisión de BC sea uno de los efectos e indicadores más representativos durante la zafra de la caña de azúcar; durante este periodo también se producen otros efectos negativos directamente asociados a esta actividad.

Uno de ellos es la pérdida o descomposición de materia orgánica, tanto aérea como subterránea que se origina cuando ocurre un incendio, como los que ocurren cuando se cosecha la caña de azúcar por el método de quema. Cuanto más severa es la quema, más se afectan los procesos de la superficie quemada: muerte de la vegetación, invasión de plantas tóxicas, supervivencia de semillas, función hidrológica del suelo, cambios subterráneos de flora y fauna, disminución de rebrotes, así como cambios estructurales del suelo que pueden afectar a los procesos erosivos (Keeley, 2009).

Para identificar las áreas quemadas en la zona cañera de San Luis Potosí, se utilizó el Índice Normalizado de Áreas Quemadas (NBR, por sus siglas en inglés), el cual se utiliza para identificar las áreas quemadas en superficies extensas y constituye una forma de análisis del impacto de los incendios sobre la superficie terrestre, a través de su severidad (UN, 2018).

La fórmula (1) utilizada para su cálculo es parecida a la del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés); sin embargo, combina longitudes de onda diferentes: el infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR).

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (1)$$

Una vegetación saludable muestra una reflectancia alta en NIR y baja en SWIR; lo contrario ocurre cuando se tiene una vegetación enferma. Por ello, un valor alto de NBR indica vegetación saludable y uno bajo indica suelo desnudo y áreas recientemente quemadas. Las áreas no quemadas normalmente se atribuyen a valores cercanos a cero. El valor del NBR estima la severidad del fuego de un área en un momento, por lo que, para estimar su cambio a través del tiempo, es necesario utilizar un Diferencial de NBR (dNBR), con el cual se calcula la diferencia entre el NBR previo a un incendio (prefuego) y el NBR posterior al mismo (postfuego). 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. Para su cálculo se utiliza la fórmula (2) (Keeley, 2009).

$$dNBR \text{ o } \Delta NBR = NBR_{Prefuego} - NBR_{Postfuego} \quad (2)$$

Aunque los valores del dNBR pueden variar en cada caso, el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) ha propuesto una tabla para clasificar la severidad de los incendios (Tabla 1).

Habitualmente el cálculo del dNBR se realiza con softwares de sistemas de información geográfica como el ArcMap, pero actualmente existen plataformas en donde se pueden crear algoritmos especializados para automatizar el proceso. Para la presente investigación se utilizó 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 de distintas maneras, una de ellas es a través del IDE basado en el web denominado Code Editor.

Tabla 1. Clasificación de los niveles de severidad de áreas quemadas, propuesto por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS).

	Rango de dNBR		Rango de dNBR (escalado a 10^3)		Nivel de severidad
	Límite inferior	Límite superior	Límite inferior	Límite superior	
	-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

Fuente: UN, 2018.

Code Editor permite el acceso a las colecciones de los conjuntos de datos satelitales y geoespaciales a través del desarrollo de algoritmos complejos, para el mapeo de la severidad de 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.

Cuando se realizan las quemas de los cañaverales, además de afectar al suelo por la eliminación de la vegetación y la pérdida o descomposición de la materia orgánica, también se incrementa drásticamente la temperatura del suelo (TS). La TS es un parámetro fundamental de la agricultura, ya que el éxito de la germinación y el desarrollo de las plantas dependen en gran medida de ésta. No obstante, sus valores de referencia varían para los diferentes cultivos. De forma natural, los valores de la TS están en función de la estación y la radiación solar; sin embargo, actividades como las quemas de residuos agrícolas alteran dichos valores, afectando las características biológicas, químicas y físicas de los suelos.

Temperaturas demasiado bajas o altas matan los organismos del suelo y las plantas. Se ha observado que los cultivos ralentizan su desarrollo a partir de los 32°C, y a los 60°C las bacterias del suelo mueren por el calor. Asimismo, a los 38°C, la vegetación no puede absorber suficiente humedad, y pierde hasta un 85% de ésta debido a la evapotranspiración.

Aunado a ello, cuando se superan estas temperaturas el riego es poco recomendable, ya que la mayoría de los aportes de agua se convertirán en residuos debido a la rápida evaporación. Además, las gotas de agua refractadas podrían actuar como lupa y quemar la vegetación. Dado lo anterior y de forma general, se puede decir que las temperaturas óptimas para el desarrollo de los cultivos se encuentran entre los 20°C y los 35°C (Onwuka y Mang, 2018).

La TS se puede monitorear con imágenes de la NASA, específicamente con el Level-1 and Atmosphere Archive & Distribution System Distributed Active Archive Center (LAADS

DAAC), de la plataforma EARTHDATA de la National Aeronautics and Space Administration (NASA), que archiva y distribuye datos sobre nubes, vapor de agua y aerosoles en la atmósfera terrestre.

Los datos provienen del sensor MODIS-Terra, de la Colección MODIS 6 – Nivel I, Atmósfera, Tierra (Conjunto de Archivos 6). Dado que el análisis es local, se eligió el producto con la mayor resolución espacial del conjunto de datos Land Surface Temperature & Emissivity. En este caso, se seleccionó el producto MOD11A2 (MODIS/Terra LandSurface Temperature/3-Band Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid), el cual ha sido mejorado con varios cambios de calibración que proporcionan un promedio de 8 días por píxel de Land Surface Temperature and Emissivity (LST&E), con una resolución espacial de 1 kilómetro (km). Cada valor de píxel es un promedio simple de todos los píxeles LST de MOD11A1 correspondientes, recopilados dentro de un período de 8 días (LAADS DAAC, 2022).

Los archivos descargados se encuentran en formato HDF, por lo que se utilizó el software ArcMap versión 10.5, para importar y procesar la información contenida en éstos. Las temperaturas están dadas en grados Fahrenheit (°F), por lo que se transformaron a grados Celsius (°C), que es una unidad termométrica más utilizada en países como México. El proceso también incluyó la reproyección, la extracción y la clasificación de las imágenes, que en este caso se realizó en intervalos de 10°C y estableciendo como límite superior los 50°C, en donde se considera que la vegetación difícilmente puede desarrollarse.

De igual forma, indicadores como la vigorosidad de la vegetación se ven afectados tras la realización de una quema, lo cual se ve reflejado en las funciones propias de la vegetación natural o inducida en un sitio. Con el Índice de Vegetación Mejorado (EVI) de Landsat, se puede medir el nivel de salud de la vegetación de un área determinada. EVI es similar al índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) pero en éste se corrigen algunas condiciones atmosféricas y el ruido de fondo del dosel, además de ser más sensible en áreas con vegetación densa (Sergieieva, 2023). Su valor fluctúa entre -1 y 1, y es muy útil para analizar pronósticos de rendimiento, patrones de crecimiento y mapeo de la fenología de cultivos, así como para detectar las características de la cobertura del suelo (Sharma, 2020).

Para esta investigación, el conjunto de datos del EVI se obtuvo de la misma plataforma que contiene los datos de TS, por lo que sus características y procesamiento son muy similares. En este caso, el producto utilizado fue el MOD09A1G_EVI (MODIS/Terra Gap-Filled, Smoothed EVI 8-Day L4 500m SIN Grid). Este producto se calcula a partir de los productos de reflectancia de superficie MODIS (MOD09) y tiene una resolución de 500 metros (m). Fue creado para hacer que los productos MODIS para el Programa de Carbono de América del Norte (NACP, por sus siglas en inglés) sean más accesibles y utilizables simplificando el acceso a algunos de los productos de datos terrestres. El procedimiento contiene dos etapas de algoritmo, una para suavizar y otra para llenar espacios, que intentan maximizar el uso de datos de alta calidad para reemplazar las observaciones faltantes o de mala calidad (LAADS DAAC, 2022). La clasificación del EVI

para su representación se realizó en el rango establecido para el índice con intervalos de 0.2 unidades.

Dados los múltiples efectos de la actividad, posterior al monitoreo de las variables descritas, se propuso un Índice de Calidad Ambiental (ICA) que refleje en mejor medida la afectación de las zonas donde se produce e industrializa la caña de azúcar, sobre todo, durante la época de zafra, utilizando un modelo de simulación multicriterio.

Actualmente, se cuenta varios índices de calidad ambiental (ICAs), en diferentes partes del mundo, y aunque varios de ellos fueron diseñados específicamente para grandes ciudades y enfocados en la salud humana, otros consideran múltiples afectaciones. Estos índices, fueron creados principalmente por gobiernos e instituciones de investigación especializadas en el tema (Silva y Mendes, 2012; Messer et al., 2014; EPA Cartagena, 2015; Jian et al., 2017; Mancini et al, 2020; Davis et al., 2022; EPA, 2022; Wolf et al., 2022; IQAir, 2022).

En México, se emitió la NORMA Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012, el 16 de julio de 2012, en donde se establece la obligatoriedad de realizar el establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire para asentamientos humanos con más de quinientos mil habitantes y/o con emisiones superiores a veinte mil toneladas anuales de contaminantes criterio primarios a la atmósfera; zonas metropolitanas y conurbaciones; así como lugares donde se desarrollen actividades industriales que por sus características requieran del establecimiento de estaciones de monitoreo de calidad del aire y/o de muestreo de contaminantes atmosféricos (DOF, 2012). Como se puede observar, esta norma está más enfocada a ciudades de mediano a mayor tamaño, asumiendo que son las más contaminantes.

De igual forma, los ICAs implementados para el país se calculan sólo para las mayores ciudades, como el IMECA para la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) (Comisión Ambiental de la Megalópolis, 2018); los índices Aire y Salud y Calidad del Aire CDMX (Gobierno de la Ciudad de México, 2022); el Índice Aire y Salud del Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire (SINAICA) (INECC, 2022); los índices Aire y Salud y Calidad del Aire AMG (SEMADET, 2022); así como el índice Aire y Salud Nuevo León (Secretaría de Medio Ambiente, 2022), por mencionar algunos.

En cualquiera de los casos, este tipo de modelo representa en mucho mejor medida la complejidad territorial en donde las respuestas generan nueva información para comprender los fenómenos causales, simular escenarios que no existen y evaluar diferentes alternativas. Para generar estos modelos, comúnmente se utilizan técnicas de superposición. Esta metodología constituye la única vía para analizar espacialmente y de forma combinada las múltiples capas de información que forman la base de datos de un SIG (Galindo Mendoza et al., 2009).

Una de las técnicas de superposición que permite realizar evaluaciones multicriterio para resolver problemas de decisión en donde intervienen varios factores que, además tendrán distintas valoraciones, es la superposición ponderada (GEASIG, 2021). Este análisis define el problema, divide el modelo en submodelos e identifica las capas de

entrada. Cuando las capas de criterios de entrada están en sistemas de numeración distintos con rangos diferentes, cada celda de cada criterio se debe reclasificar con una escala de preferencia común para combinarlas en un único análisis. Los valores de preferencia no sólo deben asignarse con relación a los otros valores dentro de la capa, sino que también deben tener el mismo significado entre ellas. Si los criterios del análisis no tienen la misma importancia se les dará más peso a los criterios importantes que a los otros (Riad et al., 2011).

En este caso, para la creación del ICA, se utilizaron las variables descritas anteriormente: un contaminante del aire (BC), dos índices de vegetación (NBR y EVI) y una variable meteorológica (TS), mismas que tienen relación con los procesos de combustión realizados en diferentes etapas de la zafra y que tienen efectos negativos en el ambiente, la agricultura y/o la salud humana.

En este caso y dada la ausencia de índices de naturaleza similar al propuesto, se decidió asignar un mayor peso (40%) a las concentraciones de BC, que es el principal indicador de calidad del aire para el ser humano y el segundo precursor del calentamiento global. La asignación remanente se dividió de forma equivalente entre el resto de las variables. No obstante, se considera que, si el índice estuviera enfocado en las afectaciones específicas a los ecosistemas locales o a la agricultura, se le debería dar un mayor peso al EVI, el dNBR y la TS.

Finalmente, se construyó un operador booleano para cada uno de los niveles de calidad ambiental y se sobrepuso al padrón de superficie cañera obtenido a partir de la digitalización de la cartografía proporcionada por el 8° Informe Estadístico del Sector Agroindustrial de la Caña de Azúcar en México (CONADESUCA, 2021), para evidenciar la correspondencia. Se creó una escala de cinco valores ordinales, donde el primer nivel es el mejor y el último es el peor. La representación de las áreas resultantes se hizo con una paleta de colores de fríos a cálidos en congruencia con las anteriores (Tabla 2).

Tabla 2. Ponderación para el Índice de Calidad (ICA) propuesto.

	Valor	ICA
	1	Muy Buena
	2	Buena
	3	Regular
	4	Mala
	5	Muy mala

Fuente: Elaboración propia.

3. RESULTADOS

Con el análisis realizado se evidenció el incremento en las concentraciones de Carbono Negro (BC) durante la temporada de zafra, con respecto a la de no zafra. Las concentraciones más elevadas se suscitaron durante el mes de enero de 2022, con niveles que superaron los $1.8 \mu\text{g m}^{-3}$, en tanto que la más baja fue de $0.13 \mu\text{g m}^{-3}$, durante la segunda quincena del mes de junio, al terminar la temporada de zafra. De forma general, las concentraciones fueron considerablemente más bajas (hasta a una tercera parte) en la temporada de no zafra, con respecto a la de zafra. A inicios del mes de julio se observa un ligero repunte que puede estar propiciado por la salida del producto procesado a los puntos de distribución, para posteriormente descender a niveles que no sobrepasan los $0.4 \mu\text{g m}^{-3}$ en todos los ingenios, siendo los más bajos de todo el periodo (Figura 2).

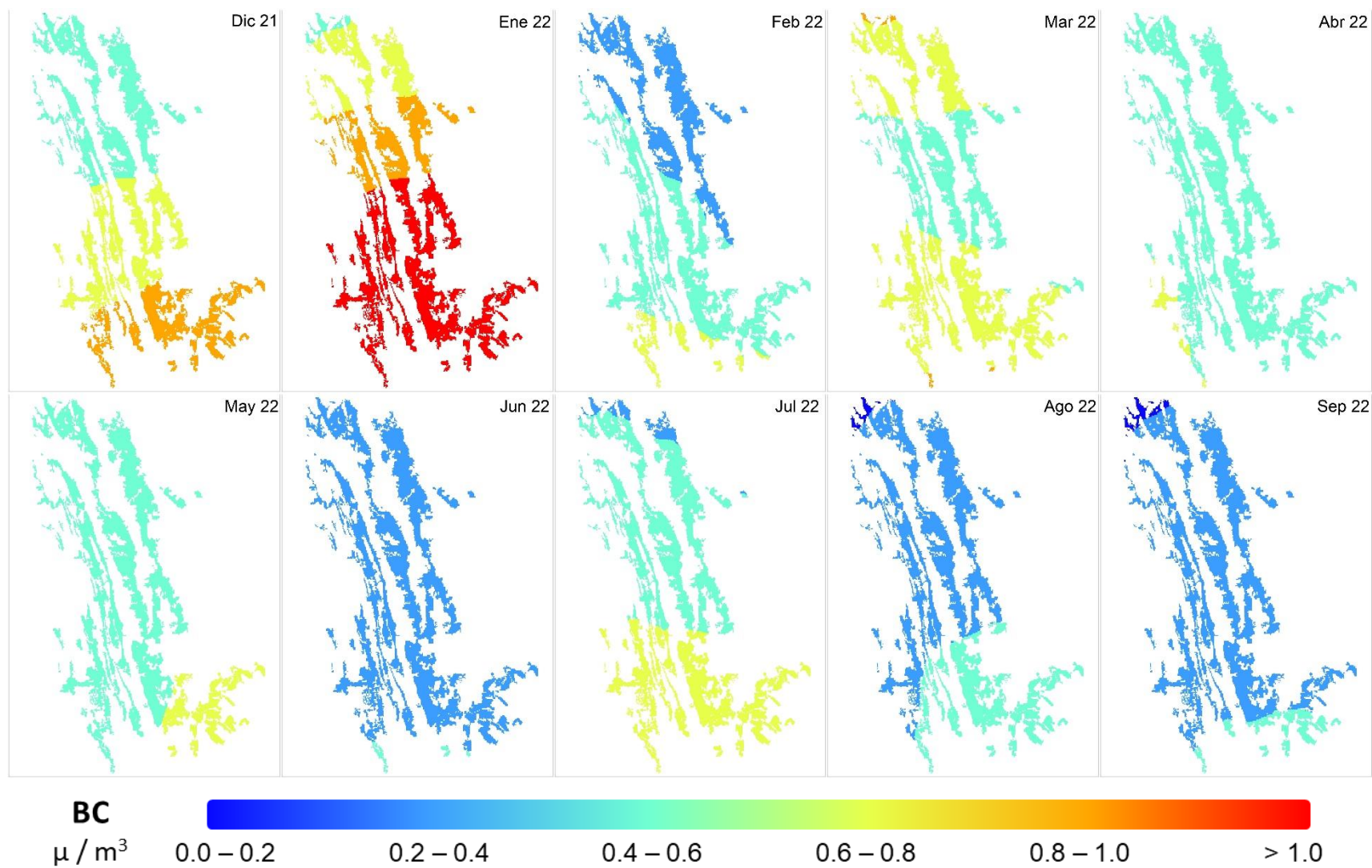


Figura 2. Carbono negro (BC) en la zona cañera de San Luis Potosí.
Fuente: Elaboración propia.

La tendencia temporal de las concentraciones fue muy similar en la superficie de abasto de los cuatro ingenios. Durante la mayor parte del periodo de análisis, el Ingenio Plan de Ayala mostró las mayores concentraciones mientras que San Miguel del Naranjo tuvo las más bajas, llegando a representar sólo el 50% de las del primero (Figura 3).

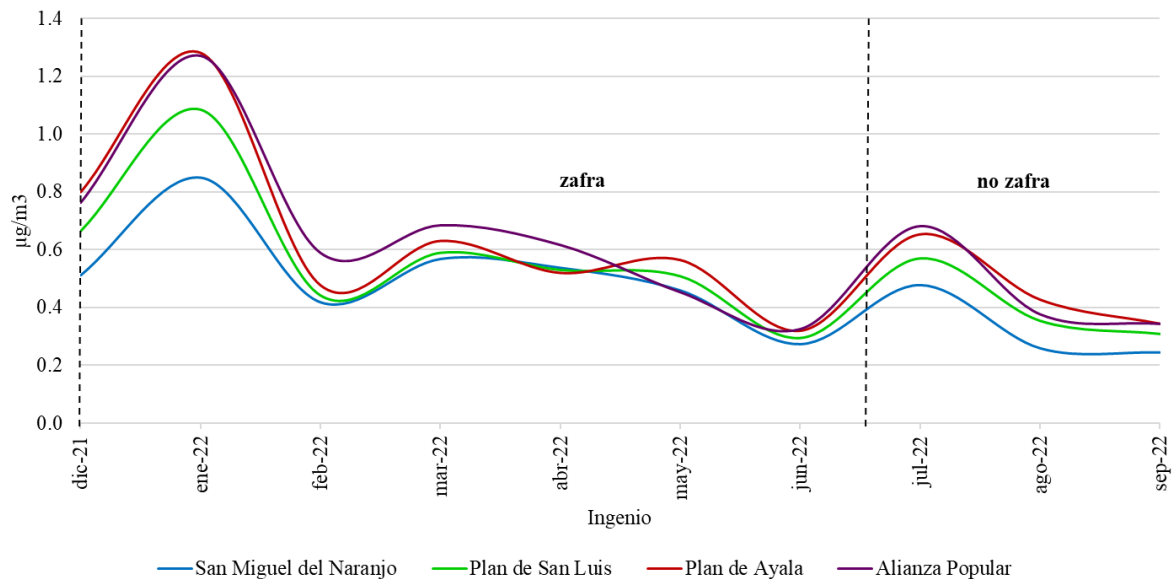


Figura 3. Análisis espectral de las concentraciones de Carbono Negro (BC) en la zona cañera de San Luis Potosí.
Fuente: Elaboración propia.

No existen normas ni criterios unificados a nivel internacional ni nacional sobre los efectos de las concentraciones de BC a diferentes niveles, pero a través de diversas investigaciones se ha comprobado que cuando se deposita en la nieve, reduce el albedo ocasionando calentamiento y mayor fusión. La deposición de entre 100 y 300 nanogramos de carbono negro por gramo de agua (ng-BC/g1-H₂O) puede reducir el albedo entre 2.7% y 6%, y que una reducción continua del albedo de entre 2% y 5.2% podrían dar lugar a un incremento en la escorrentía de entre 70 y 204 milímetros (mm), provocando el derretimiento de los polos e incrementando el nivel del océano (Suárez et al., 2017).

En lo referente a los efectos en la salud humana, la Organización Mundial de la Salud (OMS) indica que la exposición de la población a 10 µg m⁻³ de BC, en el corto plazo, puede incrementar la mortalidad en 0.9% por enfermedades cardiovasculares o en 0.7% por otras causas, mientras que una exposición prolongada a 1 µg m⁻³, incrementaría en 6% el riesgo de muerte (Janssen, 2012). Adicionalmente, Tobias et al., en 2014, concluyeron que cada incremento de 1.4 µg m⁻³ de BC aumenta el riesgo de mortalidad respiratoria en 10%.

Por otra parte, el diferencial del Índice Normalizado de Severidad de Áreas Quemadas (dNBR), mostró que la superficie cañera del estado se quema de forma escalada, a medida que avanza la zafra. Desde el mes de diciembre se pueden apreciar áreas con quemas de severidad baja, aunque con manchones que llegan a la severidad moderada-alta en las zonas de abasto de los cuatro ingenios. El máximo de las quemas se realizó durante el mes de enero, cuando en la mayor parte de la superficie se aprecian quemas con severidad baja y, en menor escala, de mayores severidades. Para los meses de mayo y junio, hacia el final de la zafra, se puede ver que las áreas quemadas durante los meses anteriores ya cuentan con rebrotes y, en septiembre, se comienzan a suscitar quemas esporádicas, probablemente para preparar los terrenos para el próximo ciclo de cosecha (Figura 4).

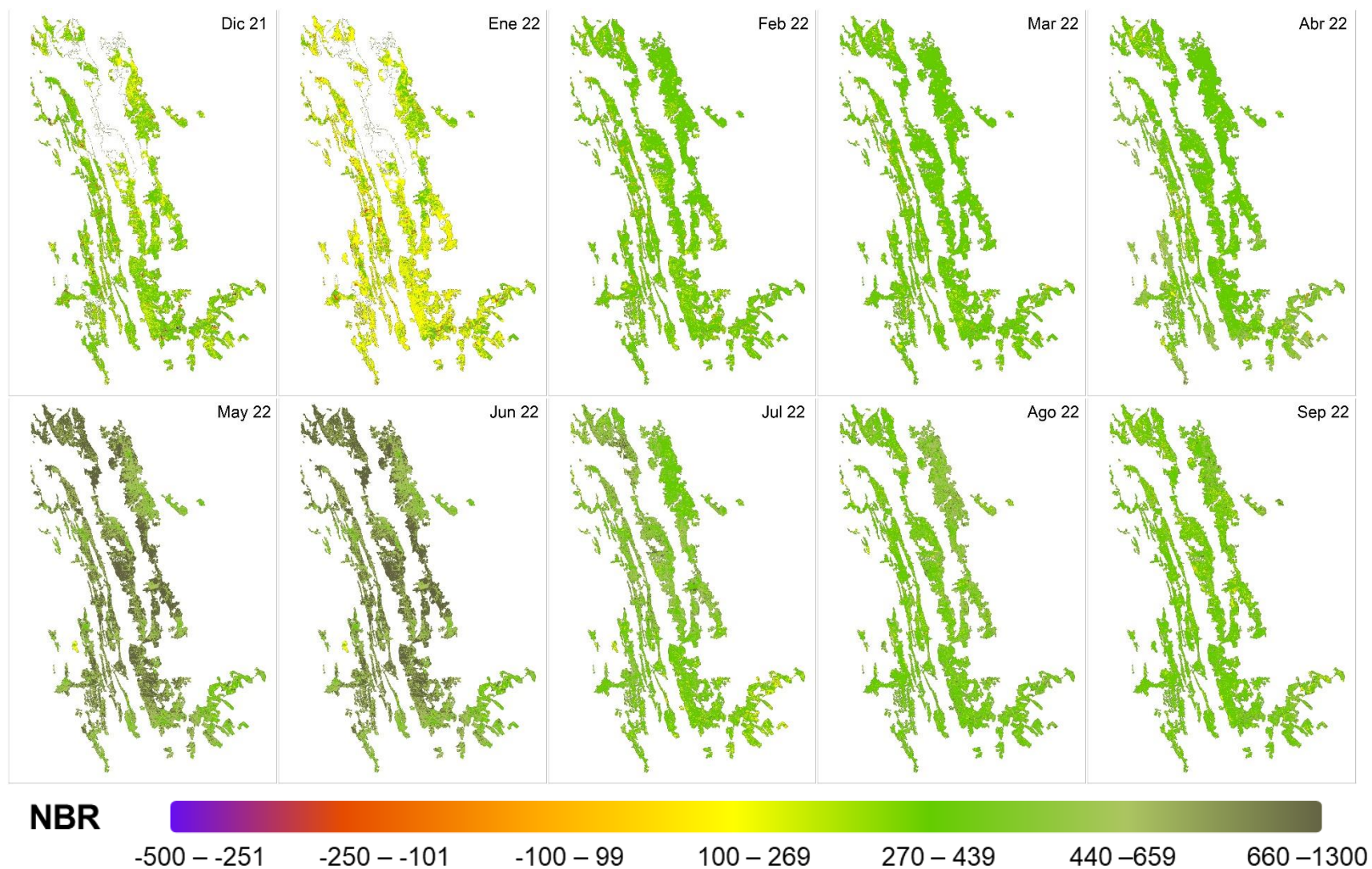


Figura 4. Índice Normalizado de Severidad de Áreas Quemadas (dNBR) en la zona cañera de San Luis Potosí.
Fuente: Elaboración propia.

Cuando se realizan quemas de baja severidad, algunas hojas de las plantas permanecen verdes, aunque los tallos se quemen. La basura superficial, musgos y hierbas son carbonizadas o consumidas. La capa orgánica del suelo permanece intacta en su mayoría, con carbonización limitada a pocos milímetros de profundidad. De forma diferente, cuando la severidad de la quema va de lo moderado a lo severo, todas las plantas del sotobosque, las ramas finas muertas en la superficie y los troncos son carbonizados o consumidos, y la capa orgánica del suelo se consume en su mayor parte (Keeley, 2009).

En lo referente a la temperatura del suelo (TS), las quemas propician su incremento provocando que exista una relación directa con la época de la zafra, sin olvidar que la TS también está relacionada con las variaciones en la temperatura atmosférica. La menor TS media mensual se registró durante el mes de enero de 2021 y fue de 17°C. Hasta la primera quincena del mes de febrero de 2022, las temperaturas se mantuvieron en rangos en los que la vegetación y los procesos edáficos se pueden desarrollar de forma adecuada; sin embargo, a partir de la segunda quincena de febrero, las temperaturas superaron los 36°C en una importante proporción de la superficie de la zona. Para el mes de mayo de ese año, casi la totalidad de la superficie de la zona cañera reportó una temperatura máxima superior a los 51°C, con una mínima de 30°C.

A partir del mes de junio las temperaturas comienzan a descender, lo cual coincide con los cambios naturales de temperatura ambiente, pero también con el final de la zafra; por lo que para el mes de septiembre se vuelven a registrar temperaturas más aptas para la vegetación y particularmente para la agricultura. En la mayoría de los meses hay un patrón de descenso de las temperaturas del suelo de este a oeste, probablemente por la influencia del incremento de la altitud de las formaciones de la Sierra Madre Oriental que limita al oeste de la región cañera potosina (Figura 5).

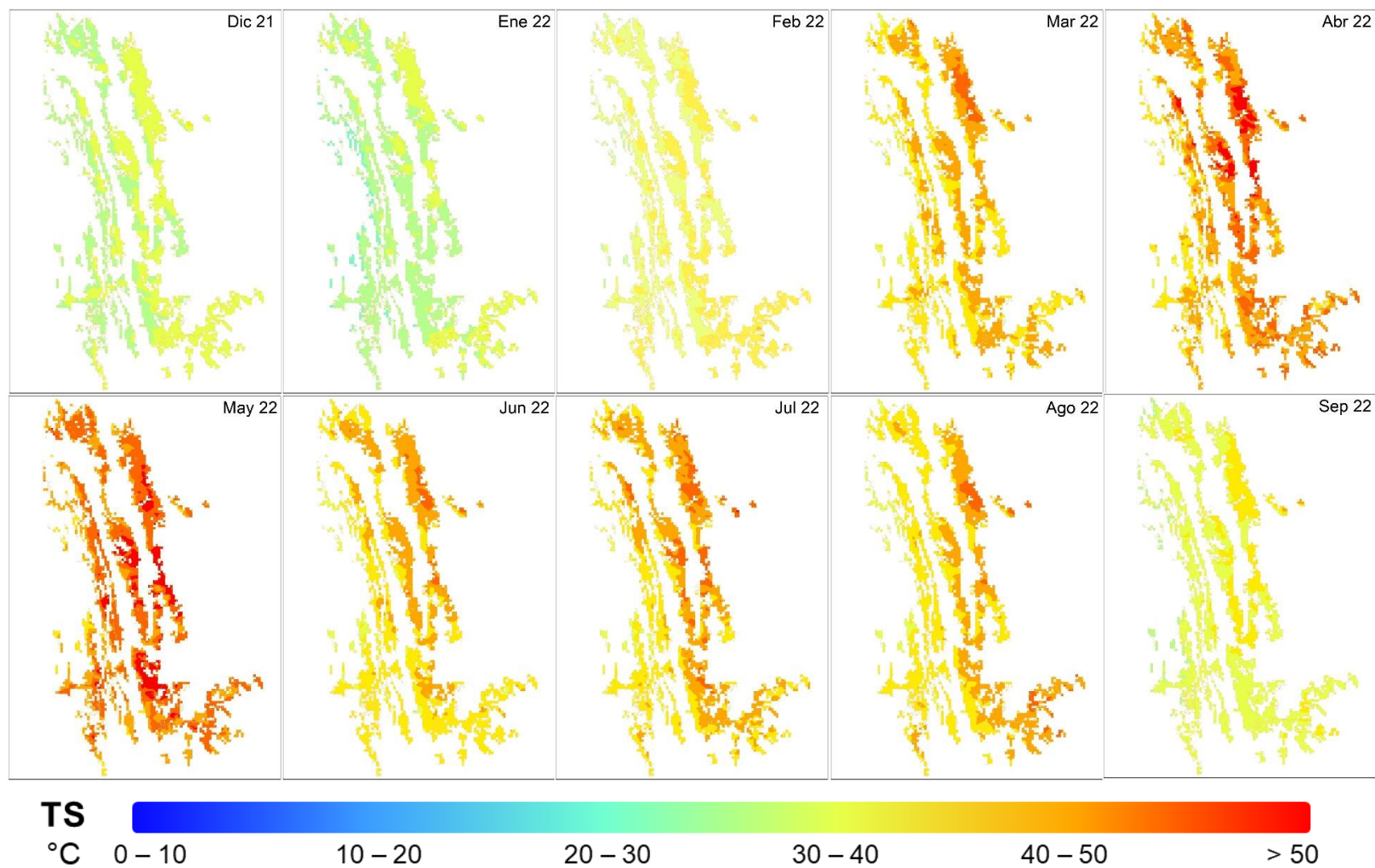


Figura 5. Temperatura del suelo (TS) en la zona cañera de San Luis Potosí.
Fuente: Elaboración propia.

Según Jordán et al., (2009), a partir de los 40°C, se detiene la actividad biológica y se frenan los procesos edafogénicos. La temperatura del suelo es particularmente importante en la agronomía, ya que afecta el desarrollo radicular de las plantas, la absorción de agua y nutrientes por parte de las raíces, la germinación de las semillas, los procesos de respiración de las raíces, así como los brotes de las yemas.

Otra de las variables analizadas, el Índice de Vegetación Mejorado (EVI), tiene un rango de valores que va de -1.0 a 1.0, mismos que están en función de la reflectancia de la superficie del suelo. Aunque algunos autores han establecido que un EVI con valores que oscilan entre 0.2 y 0.8 denotan una vegetación sana (Sergieieva, 2023); de forma general, se puede decir que una vegetación saludable muestra valores cercanos a 1.0, mientras que suelos completamente descubiertos o con vegetación muerta, muestran valores de -1.0. Es decir, hay una relación directa entre el valor del EVI y la salud de la vegetación (Vian et al., 2018).

Los resultados obtenidos en lo que respecta al EVI, para el caso de la zona cañera de San Luis Potosí, muestran que, durante el mes de diciembre de 2021, el EVI se mantuvo entre los valores de 0.2 y 0.4 mayoritariamente, a excepción de la parte noreste, en donde ya se habían realizado quemadas. En los meses subsecuentes el EVI disminuyó paulatinamente hasta el mes de junio. A partir del mes de julio, los valores comenzaron a incrementarse nuevamente durante la temporada de no zafra, para alcanzar valores que superan el 0.5. Durante el periodo de análisis, la zona de abasto del Ingenio Plan de Ayala mantuvo los menores valores y la de Alianza Popular los más altos (Figura 6).

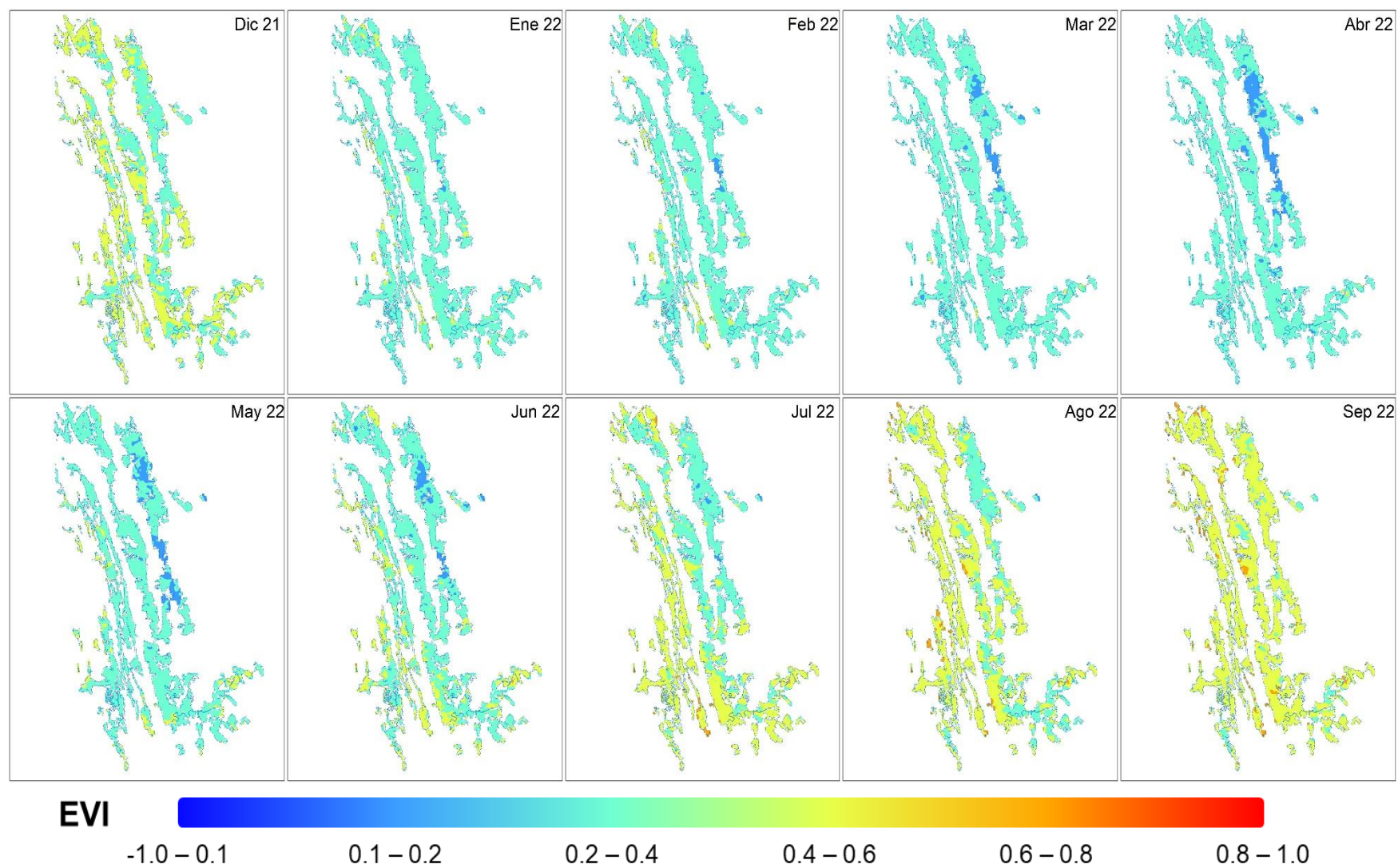


Figura 6. Índice de Vegetación Mejorado (EVI) en la zona cañera de San Luis Potosí.
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, las variables descritas están relacionadas con las actividades que realiza el sector cañero azucarero del estado de San Luis Potosí, sobre todo, durante la temporada de zafra. Por ello, se utilizaron para proponer un Índice de Calidad Ambiental (ICA) que, a diferencia de otros, se enfoque tanto en los efectos ambientales, como en los productivos y los de la salud humana.

Oficialmente, la zafra 2021-2022 en el estado de San Luis Potosí comenzó el 7 de noviembre de 2021 con el arranque de operaciones del Ingenio Plan de Ayala (CONADESUCA, 2022). No obstante, el resto de los ingenios que operan en el estado, iniciaron sus operaciones hasta la última semana de ese mes, por lo que se considera que la capacidad agroindustrial cañera plena comenzó a operar hasta el mes de diciembre de 2021. El pico de producción se ubicó en el mes de enero de 2022, para después comenzar a descender de forma paulatina hasta el final de la zafra, el 15 de junio de 2022, con la conclusión de las actividades del Ingenio Plan de Ayala, aunque el resto de los ingenios ya habían culminado previamente (Unión Nacional de Cañeros A. C., 2022).

Como resultado, se encontró que, durante el mes de diciembre de 2021, el ICA predominante en la zona cañera de San Luis Potosí fue regular; no obstante, se encontraron algunas zonas con un ICA bueno en el Ingenio San Miguel del Naranjo, así como pequeños manchones en donde el ICA llegó a ser malo en los Ingenios Plan de Ayala y Alianza Popular.

Durante el mes de enero de 2022, cuando la zafra se encontraba en pleno, los Ingenios Plan de Ayala de Ciudad Valles y Alianza Popular de Tamasopo mostraron mala calidad ambiental prácticamente en toda su superficie, llegando en algunas partes incluso a alcanzar la peor categoría de ICA.

El Ingenio Plan de San Luis de Ciudad Valles mostró una transición entre una calidad ambiental de mala a regular, mientras que la mayor parte del Ingenio San Miguel del Naranjo en el municipio del Naranjo mantuvo su calidad ambiental en estatus de regular, durante este mes.

Durante los siguientes tres meses la calidad ambiental comenzó a mejorar para llegar a ser buena prácticamente en toda la zona cañera, a partir del mes de abril de 2022, manteniendo la característica de ser peor en la parte sur y mejorar gradualmente hacia el norte.

Para el mes de junio, cuando concluyó la zafra y durante los meses subsecuentes (periodo de no zafra), se mantuvo una calidad ambiental buena en la mayor parte de la superficie, alcanzando a ser muy buena en varias zonas (Figura 7).

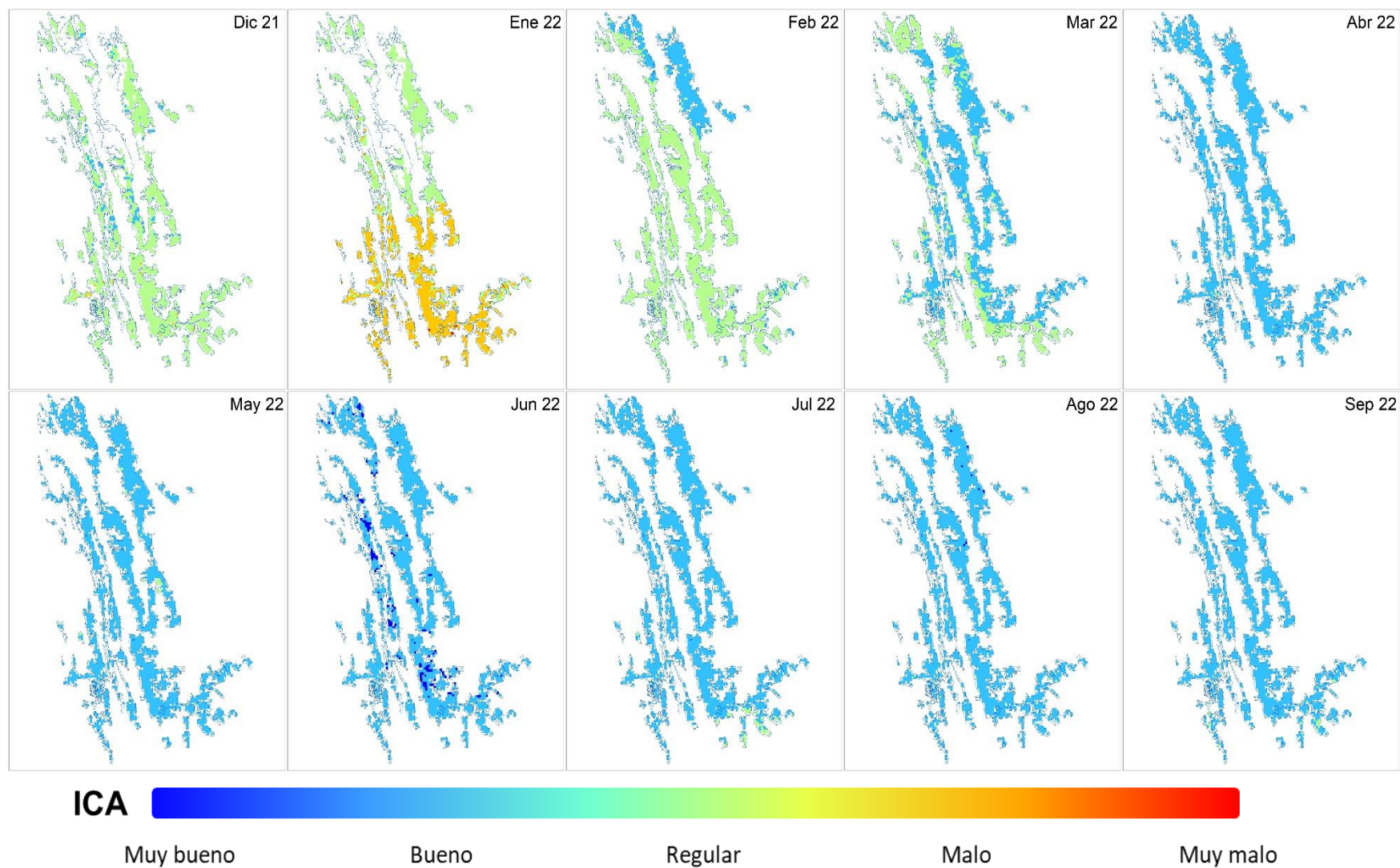


Figura 7. Índice de Calidad (ICA) propuesto para superficies cañeras, aplicado a la zona cañera de San Luis Potosí.
Fuente: Elaboración propia.

4. DISCUSIÓN

Habitualmente, el monitoreo de contaminantes del aire se realiza solo en las grandes ciudades y en países en donde se cuenta con extensas redes de estaciones de monitoreo directo, descuidando las zonas rurales y agrocidades en donde algunas actividades humanas también con causantes de altas emisiones.

El uso de tecnologías de vanguardia como la satelital permiten el monitoreo de estos contaminantes, tales como el carbono negro (BC), además de otros indicadores de la atmósfera, en superficies extensas, en tiempo cuasi real y a bajo costo. Ello permite mejorar la certidumbre en la estimación de la afectación de las actividades naturales y antropogénicas en el ambiente y la salud humana, y coadyuvar en políticas enfocadas en la reducción de las emisiones generadas.

Además, con el procesamiento de las imágenes de satélite se pueden crear índices que, con una mayor cantidad de elementos, determinen la afectación de la calidad ambiental ocasionada por una actividad o evento determinados, como la que es causada por el sector cañero azucarero del estado de San Luis Potosí, que forma parte de la segunda región cañera más extensa de México y también una de las más contaminantes.

Con el análisis realizado se pudo constatar que las variables incluidas están influenciadas, en mayor o menor medida, por la temporada de zafra. De esta forma, durante el mes de enero de 2022, cuando se alcanza el pleno de la cosecha y su procesamiento, también se tienen los más altos niveles de carbono negro, la mayor severidad en las áreas quemadas y el peor índice de vigorosidad de la vegetación.

Asimismo, se observó que durante el resto de los meses que duró la zafra, el índice de calidad ambiental no rebasó el nivel de regular, pero se incrementó hasta llegar a niveles buenos posterior a su culminación. En el mismo sentido, se puede apreciar una diferencia entre el ICA de las áreas de abasto de los diferentes ingenios; lo cual está relacionado con las características de los distintos procesos agrícolas y agroindustriales, como el método de cosecha (por quema o en verde); la modernización de maquinaria y equipo del ingenio; así como la incorporación de equipo para reducir la emisión de contaminantes, como los filtros en las chimeneas, entre otros.

En esta investigación se propuso un índice de calidad ambiental que contiene factores que afectan el ambiente, la agricultura y la salud humana. Derivado de los resultados obtenidos, se considera relevante realizar investigaciones posteriores en donde se experimente con más indicadores, se varíen los pesos y se extienda el periodo de análisis, para observar y analizar las variaciones espaciotemporales.

5. CONCLUSIONES

El desarrollo tecnológico permite que actualmente se pueda realizar el monitoreo de la calidad ambiental en zonas donde habitualmente no se realizaba, por su complejidad y altos costos. Con el monitoreo continuo se pueden construir verdaderos sistemas de

vigilancia accesibles y oportunos que coadyuven en la calidad del ambiente, especialmente en zonas en donde se desarrollan actividades de alto impacto para los sistemas productivos, para la salud humana y en general, para el ambiente.

Un ejemplo lo constituyen las zonas cañeras de México y el mundo, como la del estado de San Luis Potosí, en donde varias de sus actividades, particularmente las realizadas durante la temporada de zafra, ocasionan efectos altamente nocivos.

El carbono negro (BC), el segundo precursor del calentamiento global y uno de los principales indicadores de la calidad del aire para la salud humana, es un claro ejemplo de cómo el sector cañero azucarero está relacionado con la contaminación del aire; además, otros recursos como el suelo y el agua también se ven afectados, lo que se comprobó con un índice de calidad ambiental que muestra que, durante la temporada de zafra, la calidad ambiental de la zona, empeora.

Por lo anterior, se considera que la adopción y masificación en el uso de tecnologías de vanguardia, como la tecnología satelital, constituyen una herramienta importante para crear y dar seguimiento a medidas encaminadas a mitigar diferentes aspectos de la problemática ambiental, a diferentes escalas.

6. REFERENCIAS

Bové, H., Bongaerts, E., Slenders, E., Bijmens, E. M., Saenen, N. D., Gyselaers, W., Van Eyken, P., Plusquin, M., Roeffaers, M. B. J., Ameloot, M., & Nawrot, T. S. (2019). Ambient black carbon particles reach the fetal side of human placenta. *Nature Communications*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11654-3>

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>

Casares Long, J. J., Longhurst, J. W. S., & Barnes, J. (2020). *Air Pollution XXVIII (Wit Transactions on Ecology and the Environment, Vol 244): 28*. WIT Press/ Computational Mechanics.

Chaudhuri, I., Fruijtier-Pölloth, 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/10.1080/10408444.2017.1391746>

Comisión Ambiental de la Megalópolis. (2018, 21 septiembre). *IMECA: Índice Metropolitano de la Calidad del Aire*. GOBIERNO DE MÉXICO. Recuperado 11 de diciembre de 2022, de <https://www.gob.mx/comisionambiental/articulos/imeca-indice-metropolitano-de-la-calidad-del-aire?idiom=es>

Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA). (2021). 8° Informe Estadístico del Sector Agroindustrial de la Caña de Azúcar en México. En *Gobierno de México*. Recuperado 11 de noviembre de 2022, de

<https://www.gob.mx/conadesuca/es/articulos/8-informe-estadistico-del-sector-agroindustrial-de-la-cana-de-azucar-en-mexico?idiom=es>

Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA). (2022). *Reportes*. Sistema Sinfocaña. Recuperado 15 de diciembre de 2021, de <https://www.gob.mx/conadesuca/acciones-y-programas/sistema-infocana>

Davis, Z., de Groh, M., & Rainham, D. G. (2022). The Canadian Environmental Quality Index (Can-EQI): Development and calculation of an index to assess spatial variation of environmental quality in Canada's 30 largest cities. *Environment International*, 170, 107633. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107633>

Diario Oficial de la Federación (DOF). (2012). NORMA Oficial Mexicana NOM-156-SEMARNAT-2012, Establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire. En *DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN*. Recuperado 12 de diciembre de 2022, de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5259464&fecha=16/07/2012#gs c.tab=0

Dobbie, M., & Dail, D. (2014). Environmental Indices. *Wiley StatsRef: Statistics Reference Online*. <https://doi.org/10.1002/9781118445112.stat07691>

Establecimiento Público Ambiental de Cartagena (EPA Cartagena). (2015). *ÍNDICE DE LA CALIDAD DEL AIRE*. Observatorio Ambiental de Cartagena de Indias. Recuperado 18 de diciembre de 2022, de <https://observatorio.epacartagena.gov.co/gestion-ambiental/calidad-ambiental/sistema-urbano/indice-de-la-calidad-del-aire/>

Galindo Mendoza, M. G., Contreras Servín, C., & Olvera Vargas, L. (2009). Metodología para determinar zonas de peligro al ataque de la plaga de langosta centroamericana (*Schistocerca piceifrons piceifrons* Walter, 1870) apoyados en sensores de alta resolución y SIG. Estudio de caso: la Huasteca Potosina-México [Impreso]. En *Conceptos de Geomáticas y estudios de caso en México* (1.a ed., pp. 331-361). Raúl Aguirre Gómez.

GEASIG. (2021, 24 mayo). *Superposición Ponderada con ArcGIS*. Recuperado 18 de diciembre de 2022, de <https://www.geasig.com/superposicion-ponderada-con-arcgis/>

Gobierno de la Ciudad de México. (2022, 15 diciembre). *Calidad del aire*. Dirección de Monitoreo Atmosférico. Recuperado 15 de diciembre de 2022, de <http://www.aire.cdmx.gob.mx/default.php>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2022). *Calidad del aire*. Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire, SINAICA. Recuperado 20 de diciembre de 2022, de <https://sinaica.inecc.gob.mx/index.php>

IQAir. (2022, 20 diciembre). *Índice de la calidad del aire (ICA) de Buenos Aires y contaminación del aire en Argentina* | IQAir. Recuperado 20 de diciembre de 2022, de <https://www.iqair.com/es/argentina/buenos-aires>

Janssen, N. A. H., Gerlofs-Nijland, M. E., Lanki, T., O Salonen, R., Cassee, F., Hoek, G., Fisher, P., Brunekreef, B., & Kryzanowski, M. (2012). *Health Effects of Black Carbon*.

World Health Organization, Regional Office for Europe.
https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0004/162535/e96541.pdf

Jian, Y., Wu, C., & Gohlke, J. (2017). Effect Modification by Environmental Quality on the Association between Heatwaves and Mortality in Alabama, United States. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(10), 1143. <https://doi.org/10.3390/ijerph14101143>

Keeley, J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116. <https://doi.org/10.1071/wf07049>

Liu, X., Zheng, M., Liu, Y., Jin, Y., Liu, J., Zhang, B., Yang, X., Wu, Y., Zhang, T., Xiang, Y., Liu, B., & Yan, C. (2022). Intercomparison of equivalent black carbon (eBC) and elemental carbon (EC) concentrations with three-year continuous measurement in Beijing, China. *Environmental Research*, 209, 112791. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112791>

Ma, H., Zeng, J., Zhang, X., Fu, P., Zheng, D., Wigneron, J. P., Chen, N., & Niyogi, D. (2021). Evaluation of six satellite- and model-based surface soil temperature datasets using global ground-based observations. *Remote Sensing of Environment*, 264, 112605. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112605>

Mancini, S., Guida, M., Graziuso, G., Quartieri, J., & Guarnaccia, C. (2020). Development of an Environmental Quality Index to Assess Physical Agents Pollution. *Journal of Physics: Conference Series*, 1603(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1603/1/012005>

MegalÃ3polis, C. A. de la. (s. f.). *IMECA: ndice MEtropolitano de la Calidad del Aire*. gob.mx. <https://www.gob.mx/comisionambiental/articulos/imeca-indice-metropolitano-de-la-calidad-del-aire?idiom=es>

Messer, L. C., Jagai, J. S., Rappazzo, K. M., & Lobdell, D. T. (2014). Construction of an environmental quality index for public health research. *Environmental Health*, 13(1). <https://doi.org/10.1186/1476-069x-13-39>

Mordukhovich, I., Wilker, E., Suh, H., Wright, R., Sparrow, D., Vokonas, P. S., & Schwartz, J. (2009). Black Carbon Exposure, Oxidative Stress Genes, and Blood Pressure in a Repeated-Measures Study. *Environmental Health Perspectives*, 117(11), 1767-1772. <https://doi.org/10.1289/ehp.0900591>

National Aeronautics and Space Administration National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2022). Panoply [Software]. En *Goddard Institute for Space Studies (GISS)* (5.2.3). <https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>

Nivel 1 y Atmosphere Archive and Distribution System DAAC (LAADS DAAC). (2022). Terra Land Surface Temperature/3-Band Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid

[Conjunto de datos]. En LAADS DAAC (MOD11A2). <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>

Oficina Global de Modelado y Asimilación (GMAO). (2015). *MERRA-2 tavg1_2d_aer_Nx: 2d,1-Hourly,Time-averaged,Single-Level,Asimilation* (Aerosol Diagnostics V5.12.4) [Conjunto de datos]. Goddard Earth Sciences Data and Centro de Servicios de Información (GES DISC),. <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>

Oliveira, L. M., & Rodrigues, J. J. (2011). Wireless Sensor Networks: a Survey on Environmental Monitoring. *Journal of Communications*, 6(2). <https://doi.org/10.4304/jcm.6.2.143-151>

Onwuka, B., & Mang, B. (2018). Effects of Soil Temperature on Some Soil Properties and Plant Growth. *Advances in Plants & Agriculture Research*, 8(1). <https://doi.org/10.15406/apar.2018.08.00288>

Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA). (2017, 3 junio). *Monitoreo ambiental*. OEFA. Recuperado 10 de diciembre de 2022, de <https://www.oefa.gob.pe/monitoreo-ambiental-2/ocac02/>

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>

Riad, P., Billib, M., Hassan, A., Salam, M., & El Din, M. (2011). Application of the overlay weighted model and boolean logic to determine the best locations for artificial recharge of groundwater. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 5(2), 57-66. <https://doi.org/10.4090/juee.2011.v5n2.057066>

Ruiz-Villavicencio, E., López-López, M. N., Cetina-Alcalá, V. M., & Ramírez-Guzmán, M. E. (2020). Modelación y estimación de NO₂ y O₃ en zonas rurales y suburbanas del Valle de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. <https://doi.org/10.20937/rica.53548>

Secretaría de Medio Ambiente. (2022, 21 diciembre). *Mapa Calidad del Aire*. AIRE NL.GOB.MX. Recuperado 21 de diciembre de 2022, de http://aire.nl.gob.mx/map_calidad.html

Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial (SEMADET). (2022, 20 diciembre). *Calidad del Aire AMG*. SEMADET. Recuperado 20 de diciembre de 2022, de <https://aire.jalisco.gob.mx/mapaf2019>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2018, 18 abril). *Calidad del aire, el desafío de las grandes urbes*. Gobierno de México. Recuperado 11 de diciembre de 2022, de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/calidad-del-aire-el-desafio-de-las-grandes-urbes>

Sergieieva, K. (2023, 6 enero). *Vegetation Indices To Drive Digital Agri Solutions*. EOS Data Analytics. Recuperado 8 de enero de 2023, de <https://eos.com/blog/vegetation-indices/>

Sharma, A. (2020, 22 septiembre). *Enhanced Vegetation Index (EVI) and its significance in agriculture monitoring*. Satyukt Analytics Private Limited. Recuperado 15 de diciembre de 2022, de <https://satyukt.com/enhanced-vegetation-index-evi-and-its-significance-in-agriculture-monitoring/>

Silva, L. T., & Mendes, J. F. (2012). City Noise-Air: An environmental quality index for cities. *Sustainable Cities and Society*, 4, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2012.03.001>

SkyWatch. (2022, 17 agosto). *Top 9 Free Sources of Satellite Data [2022 Update]*. Recuperado 12 de diciembre de 2022, de <https://skywatch.com/free-sources-of-satellite-data/>

Steinhart, C. E., Schierow, L. J., & Sonzogni, W. C. (1982). An environmental quality index for the Great Lakes. *Journal of the American Water Resources Association*, 18(6), 1025-1031. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1982.tb00110.x>

Suárez, L., Torres, C., Helmig, D., & Hueber, J. (2017). Medición y análisis del aerosol de carbono negro en el observatorio de Huancayo, Perú. *Revista Boliviana de Física*, 30, 7-15. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1562-38232017000100003&lng=en&tlng=es

Tobias, A., Karanasiou, A., Reche, C., Amato, F., Alastuey, A., & Querol, X. (2014). Efectos del carbón negro sobre la salud respiratoria en la ciudad de Barcelona. *European Respiratory Journal*, 44, 2923. https://erj.ersjournals.com/content/44/Suppl_58/2923.short

Unión Nacional de Cañeros, A. C. (2022). Estadística Actual: CONCLUYE ZAFRA 2021/22 [Conjunto de datos]. En *caneros.org.mx*. <http://caneros.org.mx/estadistica-actual/>

United Nations (UN). (2018). *Normalized Burn Ratio (NBR)*. UN-SPIDER Knowledge Portal. Recuperado 14 de diciembre de 2022, de <https://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-burn-severity/in-detail/normalized-burn-ratio>

United States Environmental Protection Agency (EPA). (2022, 6 junio). *Environmental Quality Index (EQI)*. US EPA. Recuperado 18 de diciembre de 2022, de <https://www.epa.gov/healthresearch/environmental-quality-index-eqi>

Vian, A. L., Bredemeier, C., Silva, P. R. F. D., Santi, A. L., Silva, C. P. G. D., & Santos, F. L. D. (2018). Limites críticos de NDVI para estimativa do potencial produtivo do milho. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, 17(1), 91. <https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v17n1p91-100>

Wolf, M., Emerson, J., Esty, D., De Sherbinin, A., & Wendling, Z. (2022). *Environmental Performance Index*. EPI. Recuperado 20 de diciembre de 2022, de <https://epi.yale.edu/>

Yañez Narvaez, A. I. (2022, 24 noviembre). *Monitoreo ambiental*. Economipedia. Recuperado 10 de diciembre de 2022, de <https://economipedia.com/definiciones/monitoreo-ambiental.html>

Yong, M., Anderle, L., Levy, L., & McCunney, R. J. (2019). Carbon Black and Lung Cancer Mortality—A Meta-regression Analysis Based on Three Occupational Cohort Studies. *Journal of Occupational & Environmental Medicine*, 61(11), 949-00. <https://doi.org/10.1097/jom.0000000000001713>

VI. ECONOMIC ASSESSMENT OF THE IMPACT OF THE SUGARCANE INDUSTRY: AN EMPIRICAL APPROACH WITH TWO FOCUSES FOR SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO



J Multidisciplinary
Scientific Journal



Article

Economic Assessment of the Impact of the Sugarcane Industry: An Empirical Approach with Two Focuses for San Luis Potosí, México

Pedro Pérez Medina ^{1,*}, María Guadalupe Galindo Mendoza ², Gregorio Álvarez Fuentes ³,
Leonardo David Tenorio Martínez ⁴ and Valter Armando Barrera López ⁵

J 2023, 6, 342–360. <https://doi.org/10.3390/j6020024>

<https://www.mdpi.com/journal/j>

ABSTRACT

The sugarcane industry has a high environmental impact. In countries such as Mexico, cultivation and harvesting practices consume and pollute many ecological resources. However, quantifying these impacts is difficult due to their diverse nature and different units of measurement. In this study, an approach with two focuses was taken to assess the environmental costs of the sugarcane industry in San Luis Potosí, México. The first focus is human health costs related to air pollution (black carbon) and the second one is a lifecycle assessment applied to the production phase. In the first case, four scenarios, with different concentrations and populations, were projected. Costs of 516.8 thousand USD were estimated for a scenario in which black carbon concentrations exceeded the WHO reference by one unit for the total population. In the second case, costs of 642 million USD were estimated for the impairment of seven ecosystem-based services. These estimates may vary due to the source and specificity of the information provided, but nevertheless are considered an appropriate approximation of the cost of environmental damage. It is recommended that first-hand information be collected and systematized to improve the certainty of the estimates and that changes to sugarcane agrifood systems be considered to reduce environmental costs.

Keywords: pollution; indiscriminate use of resources; harmful practices; valuation

1. INTRODUCTION

The impact of human activities on the planet can profoundly affect its ecosystems. Climate change, ocean acidification, permafrost thaw, habitat loss, eutrophication, storm water runoff, air pollution, and invasive species are just some of the problems they cause [1].

Their cumulative impacts and other pressures can have serious consequences for ecosystem functions and for the provision of goods and services [2]. All of these impacts impose costs that should be borne by polluters to reduce or repair the environmental damage caused by their activities [3].

Agriculture is a particularly vulnerable industry because it must feed a growing population in an adverse climatic environment while trying to minimize environmental and human health impacts [4]. However, to date, environmental impacts have been significant: food production accounts for more than one-third of global greenhouse gas (GHG) emissions, which includes emissions from agriculture, land use change, and the supply chain (transportation, packaging, food processing, retail, cooking, and waste) [5].

Emissions are quantified based on food production, not consumption. This means that they do not consider international trade. Half of all habitable land and 70% of the fresh water drawn are used for agriculture and cause 78% of the world's ocean eutrophication. Similarly, livestock accounts for 94% of non-human mammal biomass [6].

Some products have a particularly high environmental impact, such as meat and dairy products, which have the largest carbon footprint. Among agricultural products, dark chocolate, coffee, oils, rice, peanuts, and sugarcane stand out as having the highest GHG emissions [7].

The current market for goods and services does not reflect the true value of the resources used to produce them. In other words, the market does not allocate resources efficiently because it does not consider the value of the environment. This represents a market failure and results in external costs incurred in the value chain of a product not being reflected in its final price and becoming negative externalities [8].

The reason why environmental assets are not properly valued is mainly because they are not privately owned, so there is no defined market for their transaction, as no one would be willing to pay for something they could get for free. However, the valuation of natural resources is one of the goals of sustainable development, suggesting that the environment is not a free good and its level of use is measured by indicating the scarcity of resources [9].

This problem of common or free goods, known as "The Tragedy of the Commons," was first identified by Hardin [8]. In the case of goods that have no distinct or private owner, anyone can make use of them, but no one is responsible for their care and protection, which leads to their destruction if no limits are placed on their use.

There are various methods and approaches that attempt to monetarily estimate the impact of anthropogenic activities, not only productive activities, but all activities that affect the environment [10], with quantitative physical and mathematical models being the most objective, as they relate the reduction or loss of ecosystem services to losses in productivity, human health, biodiversity, or climate, to name a few [11].

The environmental costs of human activities are estimated to exceed USD 6.6 trillion annually, equivalent to 11% of 2008 global gross domestic product (GDP), and are

projected to reach USD 28.6 trillion, equivalent to 18% of GDP in 2050. One-third of these costs are attributed to the damage caused by the three thousand largest publicly traded companies. GHG emissions and their climate impacts represent a large and growing share of environmental costs, projected to rise from 69% (4.5 trillion USD) in 2008 to 73% in 2050 (21 trillion USD), and it would be much cheaper to prevent them than to fix them [12].

In addition, more than 12 million people worldwide die each year from exposure to pollutants in air, water, soil, food, and materials in their homes and/or workplaces [13]. This exposure causes health problems such as respiratory disease, heart disease, and some types of cancer. Low-income populations are more vulnerable to living in these areas, with children and pregnant women at the highest risk for pollution-related health problems [14]. In 2019, air pollution from fine particulate matter (PM_{2.5}) caused 6.4 million premature deaths, 93 billion days of illness, and 8.1 trillion USD in losses, equivalent to 6.1% of GDPG [15].

Black carbon (BC) is an air pollutant contained in PM_{2.5} particles that results from the inefficient and incomplete combustion of fossil fuels and biomass and is known to have various impacts on human health and global warming, which is why it is considered one of the most important indicators of air quality [16].

Most of the world sugarcane industry, including in Mexico, undertake in its production and industrialization process activities that have a high impact on the environment and human health. Polluted air by pollutants such as BC causes short- and long-term health effects in humans, such as chronic obstructive pulmonary disease (COPD), asthma, respiratory mortality, cancer, and cardiovascular mortality, to name a few [17].

In addition, they lead to soil and water depredation and degradation, air pollution, and impacts on human health and biodiversity, with effects such as global warming, among others [18–22]. In this regard, there are many advances that have addressed this problem in terms of its identification and quantification.

Mexico is the sixth-largest sugarcane producer in the world [23]. Its sugarcane cultivation area covers 15 states; San Luis Potosí is part of the northeastern sugarcane region. During the 2021–2022 harvest, the state produced 5 million 620 thousand tons of sugarcane on 103 thousand hectares [24], making it the fourth most important agricultural product in the state in terms of harvested area and the second most important in terms of value of production [25]. These figures show its economic and social importance, but also the extent of its impact.

This is a clear example of a case in which government intervention is needed to regulate a sector that, although of great socioeconomic importance to a large part of the population of the country, also has effects whose costs have not been internalized through public policies, as envisaged by the Coase theorem [26].

The objective of this study was to determine the impact of the sugarcane sector on ecosystem services and to formulate an approach to their economic quantification using two focuses, using the sugarcane zone of San Luis Potosí, México as an example.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1. Study area

The sugarcane area of San Luis Potosí is part of the northeastern sugarcane region of Mexico, the second largest in the country [27]. There are four mills operating in the state that process sugarcane for industrial purposes, all in the Huasteca region. Plan de Ayala and Plan de San Luis in Ciudad Valles; Alianza Popular in Tamasopo, and San Miguel del Naranjo in El Naranjo. The main access road to the area is Federal Highway 70, which crosses the state horizontally and connects the capital with the Port of Tampico. The region is also crossed vertically by Highway 85 (Mexico-Nuevo Laredo).

The physiography is varied and consists of plateaus, valleys, plains, mountains and Lomeríos in the three sub-provinces that integrate it: Plains and Lomeríos, Carso Huasteco and Gran Sierra Plegada. It has a warm climate, but also a semi-warm and even a temperate climate, with rainfall ranging from 1,200 mm to 3,500 mm per year. This region, composed of four watersheds, is located in the hydrologic region of the Lower Pánuco River, which has significant runoff due to the extensive river network that flows into it [28].

This area was chosen as an example of the approach to assess ecosystem services affected by the sugarcane industry (Figure 1).

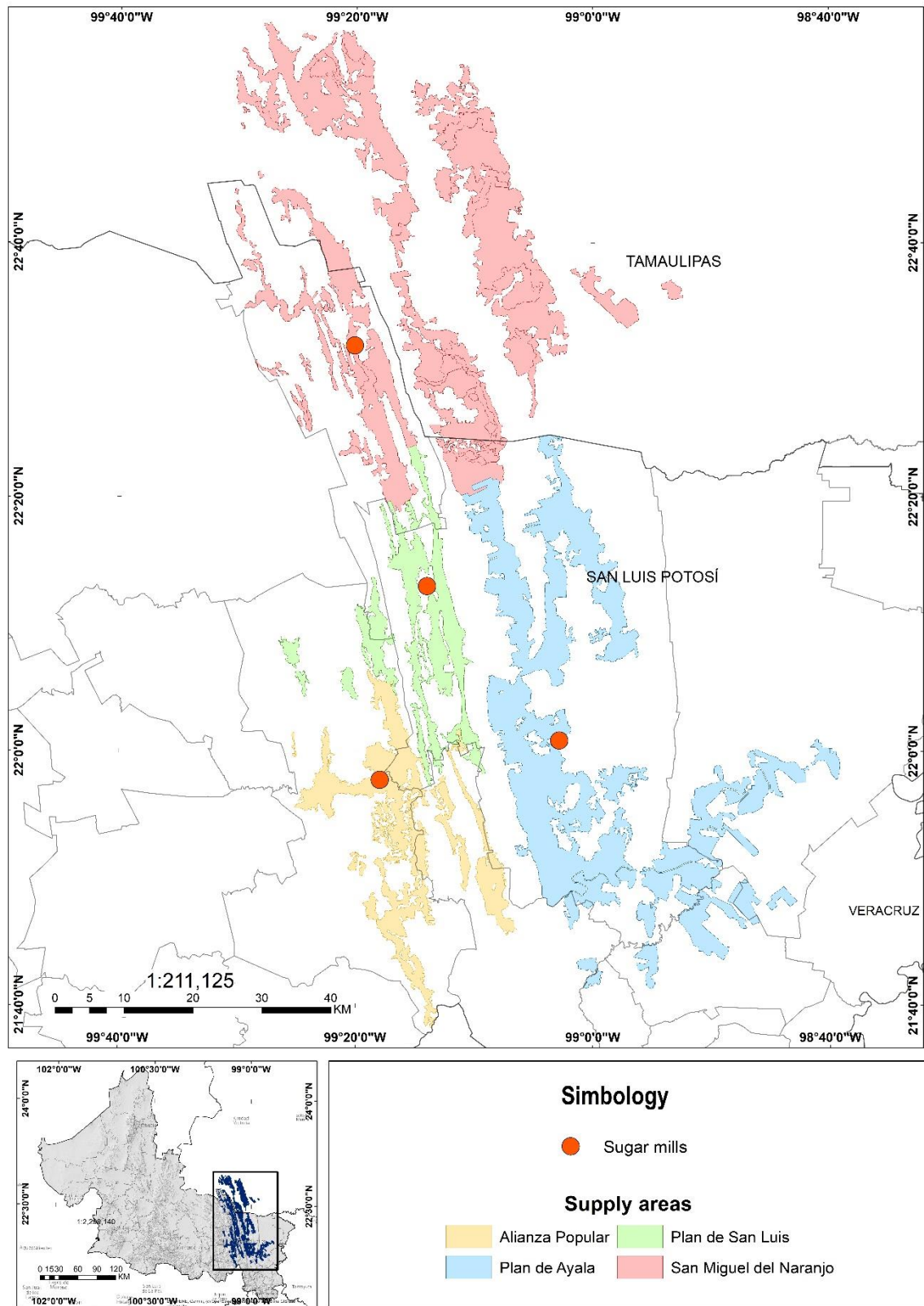


Figure 1. Location of supply areas sugarcane and sugar mills in San Luis Potosí.

2.2. Model of costs

With the models developed, the attempt was made to predict what would happen before certain changes in the variables considered, *ceteris paribus* (assuming no changes in the other variables), in order to simplify the analysis, while understanding that in reality, variations do not occur in isolation.

For this purpose, simplifications had to be made and information taken from other related studies in this initial approach to assessing the environmental impact of sugarcane–sugar activity in the state of San Luis Potosí, Mexico, particularly in Ciudad Valles.

2.2.1. Model of Costs Associated with Human Health Due to Exposure to Air Pollution

For this study, we used a model of costs associated with illnesses caused by the exposure of the population to polluted air [18,29,30], taking as an example the case of black carbon (BC) in Ciudad Valles, San Luis Potosí.

To evaluate the negative externalities, i.e., the monetary burden of health risks, Value of Statistical Life (SVL), Cost of Illness (COI), and Disability-Adjusted Life-Years (DALY) methods are used for the criteria of mortality and morbidity, which are evaluated separately. Mortality is assessed using SVL, which is generally available for each country and is based on estimates for labor wages or insurance completions.

The total costs by exposure to air pollution are calculated with Formula 1.

$$\text{Total USD Costs} = \text{MBC} + \text{MTC} \quad (1)$$

where MBC is the total morbidity costs and MTC is the total mortality costs.

All formulas, procedures, and specifications for calculating total cost are provided in Appendix A.

It was noted that in reality, it is very unlikely that there are isolated variations in variables such as BC concentration, concentration fraction of BC in PM_{2.5} particles, percentage of exposed population, wind direction and speed, topography of the area, and composition of BC itself (BC from fossil fuels + BC from biomass), and that by combining all the changes in these variables, there are infinite possibilities of influence and associated costs.

This assessment method proposed scenarios in which only one of the factors that can influence the impact were varied, based on the critical variable regulated at the national and international level for human health impacts: the BC concentration, measured indirectly through the concentration of PM_{2.5} particles.

In evaluating the case of México taking as example the sugarcane industry of the state of San Luis Potosí, the following considerations were taken:

- Ciudad Valles is a small city located in a valley with an approximate territorial extension of 9 km from east to west and 9 km from north to south.
- Maximum average wind speed is 1.9 m/s, but it occurs occasionally during the summer, while the period with lower wind speeds occurs during the sugarcane harvest in November to May (winter and spring). According to the data obtained in the field, the average wind speed in the period from December 2020–May 2021 was 0.25 m/s.
- Monitoring in the field showed that the average daily concentration of BC during the harvest was $0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, and after the completion of the harvest, it decreased to values close to zero, corresponding to about $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ of $\text{PM}_{2.5}$ particles according to the literature consulted. Based on this information, the first scenario was proposed.
- Although BC concentration is highest in winter, when dispersion is lowest due to low wind speed, it has been observed that BC concentration is directed towards the city due to the valley–mountain effect, so it can be assumed that a significant part of the population may be affected by this pollution.
- In fact, the general public also has different cleaning habits during this time of year. The image inserted in the article shows the spread of pollution caused only by the mill, without considering that the areas where the sugarcane is burned, which is also a source of emissions, surround a large part of the city.
- The second scenario is due to the daily limit of the Mexican standard NOM 025 SSA1-2021 [31], which associates this $\text{PM}_{2.5}$ concentration with poor air quality and high health risk.
- The third scenario follows a critical concentration level and is associated with a high and very high health risk according to the 172 SEMARNAT-2019 standard [32] for determining and announcing the air quality and health risk index.
- The exposed population (N) was assumed to be the population of Ciudad Valles, San Luis Potosí, located near the Plan de Ayala sugar mill and part of the area served by the mill. According to the Censo de Población y Vivienda [33], this city has about 137 thousand inhabitants.
- Since WHO does not have reference values for BC, the values established for $\text{PM}_{2.5}$ were used. It was assumed that BC represents about 11-12% of $\text{PM}_{2.5}$ [34], so at the end of the calculation the corresponding interpolation was performed to estimate the value for BC, with other three scenarios where we varied the proportion of BC in $\text{PM}_{2.5}$, in a range of 5%, 12% and 20%.
- A VSL value recently estimated for Mexico by Rojas and Montero [35] was used. The VSL calculated by these researchers was USD 416,096 for 2018 and its updated value for 2023 is USD 488,580.
- According to World Bank (WB) [36], the Mexican GDP per capita was USD 10,045.7 for 2021, so this data was used for the calculation.

- In the cases where was necessary the exchange dollars-mexican pesos or vice versa, the peso-dollar parity for March 2, 2023, was considered, which was 18.1149 – 1.0000 [37].
- For this study, an estimated COI for Mexico was considered, which refers to diseases caused by air pollution. The COI for the general population is USD 30,725 per case in 2010, converted to 2023 prices [38].

2.2.2. Assessing the impact of sugarcane on ecosystem services

The second focus is part of the methodologies have emerged that attempt to capture a larger number of elements that allow for a more comprehensive and holistic assessment of impacts, including environmental and human health impacts, on soil, air, and water resources. Most of these proposals are based on lifecycle assessment (LCA).

The lifecycle of a product or service is the chronological process from extraction and processing of raw materials, production, transportation and distribution, use, maintenance, reuse, recycling, and disposal to end-of-life [39].

The LCA is a standardized method that allows the objective assessment of the impact of a product on the environment at all stages of its lifecycle (discharges, waste, atmospheric emissions, raw material, and energy consumption) [40]. The impacts generated are of different nature and therefore quantified in different units. One of the basic tasks of LCA is to unify impacts into usable numbers by categorizing different activities that generate the same impact.

In 2012, the European Union (EU) published the EN15804 standard, which sets guidelines for environmental product declarations (EPDs) by companies to ensure their transparency and comparability and to enable sustainability assessment. This standard classifies environmental impact in 15 categories (Table 1) [41]. To facilitate the quantification and comparison of environmental impacts, aggregated metrics known as Environmental Cost Indicators (ECIs) have been created to estimate the shadow price of products.

Table 1. Impact categories, according to EN15804 [42].

Impact Category/Indicator	Unit	Description
Climate change: total, fossil, biogenic, and land use.	kg CO ² -eq	Indicator of global warming potential due to greenhouse gas emissions to the atmosphere. It is divided into 3 subcategories depending on the emission source: (1) fossil resources (2) biobased resources (3) land use change
Ozone depletion	Kg CFC-11-eq	Indicator of atmospheric emissions causing stratospheric ozone layer depletion.
Acidification	kg mol H ⁺	Indicator of potential acidification of soils and waters due to release of gasses such as nitrogen oxides and sulfur oxides.
Eutrophication – freshwater	kg PO-eq	Indicator of enrichment of the freshwater ecosystem with nutrients, due to the emission of compounds containing nitrogen or phosphorus.
Eutrophication – marine	kg N-eq	Indicator of enrichment of the marine ecosystem with nutrients due to the emission of nitrogen compounds.
Eutrophication – terrestrial	mol N-eq	Indicator of enrichment of the terrestrial ecosystem with elements containing nutrients due to the emission of nitrogen compounds.
Depletion of abiotic resources: minerals and metals	kg Sb-eq	Indicator of depletion of non-fossil natural resources.
Depletion of abiotic resources: fossil fuels	MJ, net calorific value	Indicator of depletion of natural fossil fuel resources.
Human toxicity: cancer, non-cancer	CTUh	Effects on humans of toxic substances released into the environment. Subdivided into carcinogenic and non-carcinogenic toxic substances.
Ecotoxicity (freshwater)	CTUe	Effects on freshwater organisms of toxic substances released into the environment.
Water use	m ³ -eq of deprivation	Indicator of the relative amount of water used, based on regionalized water scarcity factors.
Land use	Adimensional	Measure of changes in soil quality (biotic production, erosion resistance, mechanical infiltration).
Ionizing radiation, human health	kBq U-235	Damage to human health and ecosystems associated with to radionuclide emissions.
Particulate matter emissions	Disease incidence	Indicator of potential incidence of diseases due to particulate matter emissions.

Currently, there are no comparable standards for categorizing effects, so it is assumed that several of the categories defined in the EN15804 standard are derived from extensive and reputable experimental studies and were used as a reference for this study.

To estimate the costs associated with impacts on ecosystem services, calculation factors were created that assign a monetary value to each unit of impact; the cost estimate is then the product of this factor and the units. This is known as the shadow price of environmental impacts and is an issue on which EU countries have made significant progress, even developing specific methodologies for different economic sectors [42,43].

In the Netherlands, for example, environmental costs measured by an ECI are used as selection parameters for public projects that are put out to tender [44]. The weighting factors considered for these projects using the 2019 Milieu Cost Indicator (MKI) are listed below. To estimate weighting costs for Mexico, prices were converted to MXN at the March 3, 2023, exchange rate [37] and updated through 2023 (Table 2).

Table 2. Weighting of environmental impacts based on calculation factors, converted to MXN, updated to 2023 prices.

Impact category	Unit	Weighting factor (WF) (€/unit)	WF (USD/unit)	Updated WF for México (USD/unit)
Global warming	kg CO ₂ -eq	0.05	0.045	0.055
Ozone depletion	kg CFC-11-eq	30.00	26.798	32.940
Soil and water acidification.	kg SO ₂ -eq	4.00	3.573	4.392
Eutrophication	kg PO ₄ ³ -eq	9.00	8.039	9.882
Depletion of abiotic resources elements	kg Sb-eq	0.16	0.143	0.176
Depletion of abiotic resources: fossil fuels	kg Sb-eq	0.16	0.143	0.176
Human toxicity	kg 1.4 DB-eq	0.09	0.080	0.099
Ecotoxicity (freshwater)	kg 1.4 DB-eq	0.03	0.027	0.033
Ecotoxicity of seawater	kg 1.4 DB-eq	0.00	0.000	0.000
Terrestrial Ecotoxicity	1.4 DB-eq	0.06	0.054	0.066
Creation of photochemical oxidants (smog)	kg C ₂ H ₄	2.00	1.787	2.196

For the LCA of sugarcane, the software Mobius [45] was used, a program capable of evaluating the LCA of different products; it also has a cloud that stores the assessments created, which can be used to start or complete the evaluation of different products. In this case, only the production stage for which there is a developed model was evaluated. As can be seen, sugarcane production affects eight of the fifteen impact categories considered in EN15804.

3. RESULTS

3.1. Economic valuation of air pollution from population exposure: the case of black carbon in Ciudad Valles, San Luis Potosí

In applying the above criteria to the model, several findings were made. The first is that the cost is zero if the concentration of the pollutant is equal to the limit set by the WHO, *ceteris paribus*. On the other hand, negative results are obtained when the concentration of the pollutant is below the limit set by the WHO.

Tables 3–10 show examples of what happens to the health costs related to BC exposure when the PM_{2.5} reference concentration (15 µg/m³) is exceeded by 1 mg for the entire population of Ciudad Valles, San Luis Potosi.

Table 3. R_{rm} due to the exposure to the average concentration of the pollutant.

Mortality and morbidity in the short term	Cp	Cm	Rr	R _{rm}
	Average 24-h mean data (µg/m ³)	WHO Standard (µg/m ³)	Relative risk to the pollutant	Relative risk
Total mortality	16	15	1.015	1.0015
Respiratory disease	16	15	1.022	1.0022
Cardiovascular disease	16	15	1.013	1.0013
Asthma attack	16	15	1.021	1.0021
Chronic bronchitis	16	15	1.029	1.0029

Table 4. Population Attributable Risk (PAR).

R _{rm}	Population exposed to the pollutant p(c)	R _{rm} -1	R _{rm} -1*p(c)	PAR
1.0000	1.00	0.0015	0.0015	0.0099
1.0000	1.00	0.0022	0.0022	
1.0000	1.00	0.0013	0.0013	
1.0000	1.00	0.0021	0.0021	
1.0000	1.00	0.0029	0.0029	
Σ			0.0100	

Table 5. Estimated number of cases (I_{ne}).

Concept	$I_e (10^5)$	N	I_e	I_{ne}
Total mortality	543.5	136,351	0.00544	7.34
Respiratory disease	550.9	136,351	0.00551	7.44
Cardiovascular disease	546	136,351	0.00546	7.37
Asthma attack	940	136,351	0.00940	12.69
Chronic bronchitis	694	136,351	0.00694	9.37
* Per 100,000 inhabitants	100,000			

Table 6. Value of a Statistical Life (VSL).

Year	Value
2018 (USD) ¹	416,096
2023 (USD) ²	488,550

¹ [32].**Table 7.** Mortality costs.

Concept	Value
I_{ne}	7.34
VSL (USD)	3,584,640

Table 8. Morbidity costs.

Concept	Value
I_{ne} per total morbidity	7.44
DALY	7.4
GDP per cápita in México (USD)	10,045.68
Morbidity losses (USD)	552,867

Table 9. Air pollution COI.

Concept	Value
COI (2010)	30,725
Total morbidity Ine	7.44
Exchange rate	18.1149
IR (2010-2023)	0.7403
COI (USD)	169,165

Table 10. Total health costs associated with air pollution with three proportions of BC in PM_{2.5}, a) 5%, b) 12%, c) 20%.

Concepts	PM _{2.5}	BC		
		a	b	c
Mortality costs	3,584,640	179,232	430,157	716,928
Morbidity costs	722,032	36,102	86,644	144,406
DALY losses	552,867	27,643	66,344	110,573
COI losses	169,165	8,458	20,300	33,833
Total Costs	4,306,671	251,435	603,444	1,005,741

The assumption that the entire population is exposed to air pollution by BC is not so far-fetched, because both the mill and the sugarcane zone are located around Ciudad Valles, so any harvest time, smoke and BC deposition can be observed over a large part of the city (Figure 2).



Figure 2. Black carbon from Ingenio Plan de Ayala in Ciudad Valles, San Luis Potosí.

Similarly, it can be seen that 82% of the costs are due to premature mortality from direct exposure to polluted air, while 13% are due to health problems or disability from the same cause.

In addition, Table 11 shows that each unit increase in the concentration of the pollutant (in this case $PM_{2.5}$) increases the risks of mortality and morbidity by 1 to 3%. However, considering that only 11% to 12% of $PM_{2.5}$ is attributable to BC, the increase in human health impacts due to this pollutant would be between 0.1% and 0.3%.

Table 11. Rr_m due to the exposure to the average concentration of $PM_{2.5}$ and BC.

Mortality and morbidity	Cp	Cm	Rr	Rr_m $PM_{2.5}$	Rr_m BC
Total mortality	16	15	1.015	1.5	0.2
Respiratory disease	16	15	1.022	2.2	0.2
Cardiovascular disease	16	15	1.013	1.3	0.1
Asthma attack	16	15	1.021	2.1	0.2
Chronic bronchitis	16	15	1.029	2.9	0.3

Likewise, it can be seen that 82% of the costs are due to premature mortality from direct exposure to polluted air, while 13% are due to health problems or disability from the same cause.

First, four scenarios were created, varying the concentration of the pollutant and the proportion of the population exposed to it. For the scenarios, the concentration of PM_{2.5} was varied between 16 µg/m³ and 19 µg/m³, with changes of one unit; the exposed population changed in a range from 25% to 100%, with changes of 25%.

The results showed that a 25% change in the exposed population has a similar impact on costs as a change of one additional unit above the reference value from the WHO. Likewise, a higher proportion of BC composition in PM_{2.5} leads to an increase in costs attributable to the former (Table 12).

Table 12. Economic cost scenarios caused by exposure to black carbon (BC) of the population of Ciudad Valles, S. L. P. (USD), varying pollutant concentration and exposed population.

Variable	Scenario			
	a	b	c	d
Concentration (µg/m ³)	16	18	17	19
Exposed population (%)	100	50	75	25
Mortality cost	430,157	642,057	642,057	430,157
Morbidity cost	86,644	129,325	129,325	86,644
Morbidity losses	66,344	99,026	99,026	66,344
Cost of treatment	20,300	30,300	30,300	20,300
Total cost	516,801	771,382	771,382	516,801

Then it was assumed that half of the population is constantly exposed to pollution, but PM_{2.5} concentrations and BC content in PM_{2.5} varies as follows: (a) 16 µg/m³, assuming a one-unit increase over the WHO reference; (b) 45 µg/m³, implying an approximate concentration of 5 µg/m³ BC, the maximum concentration detected in field monitoring in Ciudad Valles, San Luis Potosi, during the 2020–2021 harvest; (c) 100 µg/m³, corresponding to approximately 12 µg/m³ BC, which is the concentration detected in previous studies at some highly polluted sites.

Moreover, the BC content in PM_{2.5} was suggested to be 5%, 12% (as reported in the literature), and 15%.

With these variations, nine scenarios were generated in which the increase of BC content in PM_{2.5} was found to have a proportional effect on the increase of costs. On the other hand, it was found that the more the pollutant concentration increases, the more exponential the effect on the total cost becomes.

Thus, a change from 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ triples the cost, but if the $\text{PM}_{2.5}$ concentration increases from 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ to 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (525% change), the cost increases from 126,343 USD to 7.57 million USD, which represents a change of 5895% (Figure 3).

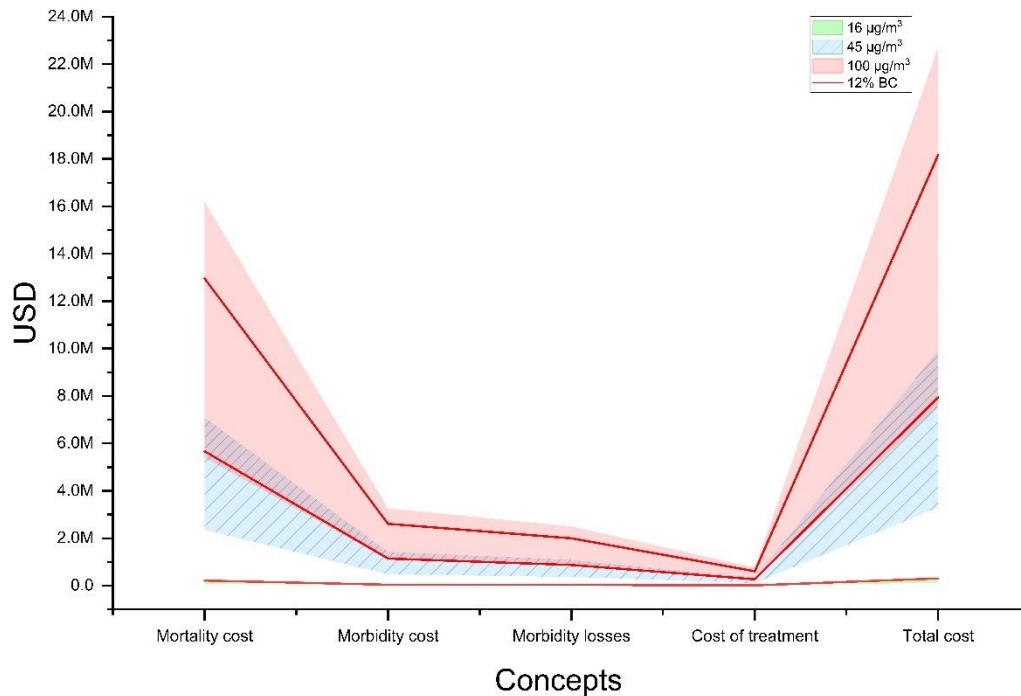


Figure 3. Economic cost scenarios caused by exposure to black carbon (BC) of the population of Ciudad Valles, S. L. P. (USD), varying pollutant concentration and BC content in $\text{PM}_{2.5}$.

3.2. Valuation of the costs of ecosystem services caused by the sugarcane sector

Using information from Hillege [44] and Ecochain [45], the second focus of the approach to the economic assessment of sugarcane impacts on ecosystem services was created. According to this model, with the given parameters, the environmental cost of impacts on ecosystem services due solely to sugarcane production reaches 114.2 USD per ton produced, with fossil fuel depletion, human toxicity, and global warming as the items with the highest costs, accounting for 63%, 20%, and 9% of the total costs, respectively (Table 13).

Table 13. Distribution of costs of ecosystem services affected by sugarcane production in San Luis Potosí by category.

Impact category	Unit	Impact/kg sugarcane	Costo/kg (USD)	Cost/ton (USD)
Global warming	kg CO ₂ -eq	0.16	0.0103	10.3
Soil and water acidification	Kg SO ₂ -eq	5.96 X 10 ⁻⁴	0.0031	3.1
Eutrophication	kg PO ₄ ³⁻⁻ -eq	3.18 X 10 ⁻⁴	0.0037	3.7
Depletion of fossil fuels	MJ	0.35	0.0000	0.0
Human toxicity	kg 1.4 DB-eq	0.20	0.0720	72.0
Ecotoxicity in freshwater	kg 1.4 DB-eq	0.02	0.0231	23.1
Ecotoxicity of seawater	kg 1.4 DB-eq	10.07	0.0008	0.8

Based on this model and production statistics from CONADESUCA [25], an estimate was made of the cost of sugarcane production in San Luis Potosi and for each of the four sugar mills located in the state during the last completed sugarcane harvest (2021–2022).

It is estimated that the environmental cost for the state of San Luis Potosí was about 642 thousand USD, representing more than 16% of the income of the producers, given a price of 646.5 USD per ton of sugarcane (Table 14). The mill with the highest cost is San Miguel del Naranjo (27%), although the difference between it and Alianza Popular, the mill with the lowest cost, is no more than 4 percentage points (Figure 4).

Table 14. Distribution of costs of ecosystem services affected by sugarcane production in San Luis Potosí by sugar mill.

Mill	Tons produced	Environmental cost (USD/ton)	Total cost (USD)
Alianza Popular	1,314,400	114.2	150,130,853
Plan de Ayala	1,355,860		154,866,417
Plan de San Luis	1,431,692		163,527,953
San Miguel del Naranjo	1,517,879		173,372,237
Total San Luis Potosí	5,619,831		641,897,459

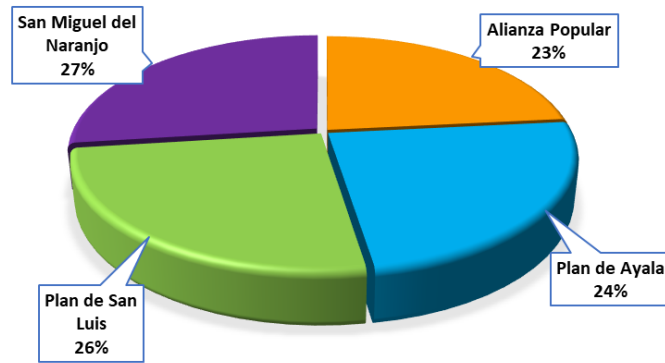


Figure 4. Costs of ecosystem services affected by sugarcane production in San Luis Potosí, proportion by sugar mill.

4. DISCUSSION

Although products derived from sugarcane have diversified, cane sugar production continues to account for the majority of production. This is especially true in countries such as Mexico, which have not achieved such diversification. In any case, new products such as bioethanol are also the result of an industrialization process.

For this reason, sugarcane cultivation is inextricably linked to the associated agricultural industry. The sugarcane industry is thus a long chain of activities, many of which have a high environmental impact. Land clearing, the use of machinery and equipment in cultivation, agrochemicals, and labor with unfair pay and treatment, such as waste disposal and combustion processes, are just some of these activities.

This is due to the growing debate on the impact of the sugarcane sector on various environmental and socioeconomic aspects [46] but additionally, competition between sugarcane and food crops for land use threatens global food production. In addition, there are the detrimental effects on biodiversity and endemic species due to land use changes [47], as well as negative environmental externalities such as GHG emissions [48]; alteration of physical [49], chemical, and biological soil properties [50], causing nutrient depletion; and acidification and eutrophication potentials [51].

In addition, there is pressure on water resources due to changes in irrigation demand, leading to depletion and degradation of available water [52]. Likewise, there are social impacts from affecting the health and well-being of farmers [53], workers, and settlers in sugarcane areas, including working conditions, land rights, workers' rights, forced labor, and child labor, to name a few [21].

Several of these impacts on ecosystem services of the sugarcane zone and its area of influence in San Luis Potosí have been revealed by several studies [54-56].

Research on the impacts of sugarcane cultivation on ecosystem services began in the early 1960s and has expanded greatly in the last decade [22]. At present, there are very structured methods of estimating the costs of the impacts of the sugarcane value chain or part of it. Some focus entirely on human health impacts [18,30,57], and although they address direct exposure to polluted air, they can serve as indicators of environmental impacts, especially when additional information is not available to build a more complex assessment of impact monetization.

For instance, the method for the economic assessment of air pollution due to population exposure, which was carried out using the example of black carbon in Ciudad Valles, San Luis Potosí, is based on losses in the public and/or private economy resulting from expenditures for the treatment of diseases related to exposure to polluted air and from the disability or premature death of people due to this reason.

This model can be used for pollutants for which there are direct or indirect reference values, such as those of the WHO, as long as any adjustments are made that result from the activity being evaluated and the characteristics of the place where it is carried out.

In addition, the model assumes that the cost of exposure of the population to air pollution begins when the established limits for these pollutants are exceeded, in this case those of [31]. Thus, when a concentration below the established reference levels is considered, the model reports negative costs, and when a concentration equal to the established reference levels is considered, the model reports costs equal to zero.

This does not mean that there is a negative cost to not meeting the WHO concentration limits, nor does it mean that there are any savings. In any case, it could be argued that the model assumes that the costs to the economy are significant only when these limits are exceeded.

This suggests that the proportion of the population exposed has a greater impact on the variation in costs than changes in pollutant concentration, at least in the case of BC.

If BC accounts for 11–12% of $PM_{2.5}$ particles, then if the reference value of WHO is exceeded by $1 \mu g/m^3$, i.e., at $16 \mu g/m^3$, the BC concentration would be about $1.75 \mu g/m^3$. According to the preliminary results of a field investigation conducted in the Plan de Ayala sugar mill area in Ciudad Valles, San Luis Potosi, during the 2020–2021 harvest season, concentrations equal to or above this concentration were reached in at least half of cases. It can be assumed that the sugarcane industry, at least in this part of the sugarcane area of the state, generates a cost to human health costs that should actually be borne by the owners of the sugarcane fields and mills.

It is important to keep in mind that variations in the model parameters, such as the specific parameters of each pollutant to economic variables such as the base year of the estimates, inflation, and the exchange rate, can cause large variations in the results. For example, the estimated cost increase is not derived from worsening air pollution in all cases.

On the other hand, and speaking of the second assessment approach, it is a clear example of the progress that has been made by institutions, companies, and individual researchers who have dedicated themselves to the study of the impact of activities on ecosystem services.

Clearly, industrial activities carried out in cities, have better control and registration systems, so their life cycles and their evaluation are more complete and with more specific information. However, agricultural industries such as sugarcane, which are just as important from an economic and social point of view, also have relevant advances.

For example, for the approximation made in this study for Mexico, taking the sugarcane area of San Luis Potosí as an example, parameters obtained in Brazil [45] were used; however, it was found that the production systems of both countries are similar, so, since there was no information from national sources, it was used for this estimation.

In this case, one of the most relevant variables that cause changes in the environmental costs of sugarcane, associated with the impacts of the ecosystem services affected, is the quantity produced, since the cost is estimated based on total cost per unit produced. Thus, given that the supply areas of the four mills located in the state produce similar quantities of sugarcane, their estimated costs are also similar.

At this point, it is appropriate to highlight the need to have more information about each of the mills not only in San Luis Potosi, but throughout the country, in order to obtain better estimates of their costs, since, as mentioned above, the impact is directly related to the characteristics of the activities carried out, so that a mill that performs irrigation does not have different impacts from one that does not, nor does one that performs green harvesting from one that harvests using the double-burning method, or mills with or without filters in their chimneys, to name a few.

In addition to research on the cost of impacts, there is also research focused on reducing those impacts. One of these came from Brazil's Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE) in 2016, which used the Virtual Sugarcane Biorefinery (VSB) to create scenarios using four management practices to model mass and energy balances in different scenarios: harvesting, tillage, machine traffic, and crop rotation. It was concluded that transitioning to green harvesting, crop rotation with crops such as sunn hemp (*Crotalaria juncea* L.), controlled traffic farming, and adoption of reduced tillage contributed to reducing the economic and environmental costs of sugarcane [58].

5. CONCLUSIONS

Agrifood systems are currently facing the complex problem of meeting the demand of a growing population for safe and nutritious food under adverse climatic conditions, without neglecting the obligation to reduce their environmental footprint.

Some of these systems, such as sugarcane cultivation, have particularly strong impact, where some production and industrial practices need to be modified to enable sustainable

development. This requires identifying and quantifying their impacts and finding alternatives to reduce them and provide better social and economic options for producers and workers in the sector.

Given the complexity of measuring the impacts of systems as a whole, some researchers have chosen to assess only a portion of the impacts and specialize in that part or section. One example is the assessment of air pollution and its associated health costs. Still within this topic, the study of some pollutants, such as black carbon (BC), is specialized and their results are used as indicators based on their properties.

The mathematical model resulting from the applied method evaluates the health costs of a population exposed to a pollutant in terms of costs and losses due to morbidity and early death.

In the case of Ciudad Valles, San Luis Potosí, Mexico, for a $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ increase in BC concentration, these costs could reach 516.8 thousand USD if the entire population were exposed to the pollutant. According to the model, costs could change more when the exposed population varies than when concentrations increase. According to preliminary results of a field research, this concentration is reached and exceeded on several days of the approximately six-month harvest each year.

On the other hand, other kind of methods and techniques have emerged that attempt to make an increasingly comprehensive assessment of the impacts of ecosystem services in their entirety for each product created and used by humans. One of the most widely used methodologies is product lifecycle assessment (LCA), which considers the impact of all stages of a product, from the inputs, production, and use to its disposal.

This method has been complemented by others, such as Environmental Cost Indicators (ECI), to determine the shadow price of products, achieving significant progress in the monetary valuation of environmental impacts.

However, not all countries are equally advanced in the development of these issues, and some, such as Mexico, are at Tier Level I or II, especially for chains such as sugarcane. In these cases, it is necessary to use information from other countries which have similar conditions in order to maintain the veracity of the parameters.

In this case, we have only obtained information on the production system, which means that the costs are underestimated because the impacts and costs of the other parts of the sugarcane industry life cycle are not considered.

The cost of the impact of seven ecosystem services was estimated at 642 thousand USD for only this part of the chain, when considering total unit cost (cost per ton), which of course means that the higher cost results directly from higher production; ignoring the differences between the industrial and the production system was necessary because we do not have this kind of specific information.

The challenge, then, is to make progress in obtaining and systematizing first-hand information that is increasingly specific and up to date, in order to improve the certainty of

results and provide accurate and timely information that contributes to decision making that promotes the sustainable development of the sugarcane sector and other productive sectors in the country.

At the same time, research based on experimentation or modeling should be advanced with system changes to try to reduce the impact of this industry. It is important to keep in mind that impacts are not limited to environmental issues, but social and economic issues must also be addressed if a real shift toward a truly sustainable industry is to occur.

6. APPENDICES

Appendix A1. Morbidity Costs

$$\text{Morbidity Costs (MBC)} = \text{DALY USD losses} + \text{COI USD losses} \quad (\text{A1})$$

$$\text{DALY USD losses} = I_{ne} \times \text{DALY} \times \text{GDP per capita} \times \text{ER} \times \text{IR} \quad (\text{A2})$$

- Estimated number of cases (I_{ne})

$$I_{ne} = I_e \times \text{PAR} \times N \quad (\text{A3})$$

where I_e are the base incidence cases per 10^5 of the population corresponding to mortality/morbidity health impacts, and the total population of the study site (N).

- Population attributable to risk (PAR)

$$\text{PAR} = \frac{\sum[\{Rr_m - 1\}] \times p(c)}{\sum[\{Rr_m - 1\}] \times p(c) + 1} \quad (\text{A4})$$

where $p(c)$ is the proportion of the population exposed to pollutant “K” [30].

The fraction of the excess disease rate in each population that can be connected to exposure to a particular air pollutant, assuming a proven causal relationship between exposure and excess disease rate without significant confounding effects on that association.

For the assessment, factors such as the relative risk Rr_m due to the average concentration of the pollutant, the population attributable to the risk (PAR), the reference cases (I_e), and the total population (N) are considered.

Relative risk (Rr_m) due to the average concentration of pollutants

$$Rr_m = 1 + (C_p - C_m) \times (Rr - 1)/10 \quad (A5)$$

Relative risk (Rr) is the ratio of the probability of an exposed group developing a disease to the probability of a non-exposed group developing the same disease due to air pollutants.

C_p is the concentration of pollutant “K” in the air; C_m is the allowable standard for pollutant “K” according to the guidelines of WHO [59]; Rr is the relative risk for pollutant “K”; the values of Rr and I_e are given in Table A1.

Table A1. Parameters considered for mortality/morbidity for the pollutant $PM_{2.5}$.

Morbidity Mortality	Relative Risk (Rr)	Reference Incidence (I_e)
Total mortality	1.015	543.5
Respiratory disease	1.022	550.9
Cardiovascular disease	1.013	546
Asthma attack	1.021	940
Chronic bronchitis	1.029	694

- DALY

The DALY indicates the years of life lost and can therefore be assessed in terms of a person’s annual income (GDP per capita). DALY value is estimated for each country and by different causes of affection. DALY from Mexico was obtained from the Global Health Observatory Data Repository [60] (Table A2).

Table A2. Disability-Adjusted Life Years (DALYs) attributable to ambient air pollution in Mexico, by 2019 [60].

Cause	Per Capita
Total	0.00043
Lower respiratory infections	0.00006
Trachea, bronchus, lung cancer	0.00001
Ischemic heart disease	0.00025
Attack	0.00006
Chronic obstructive pulmonary disease (COPD)	0.00005

- ER is the exchange rate which is used to convert the amounts to a different currency. In this case, the amounts are given in U.S. dollars to provide the reader

a better notion of the impact, since this is the most widely used currency in the world.

- IR is the inflation rate in the country, in this case in Mexico, used to update the value.

For this study, we used a model of costs associated with illnesses caused by the exposure of the population to polluted air [18,29,30], taking as an example the case of black carbon (BC) in Ciudad Valles, San Luis Potosí.

$$COI\ USD\ losses = COI \times I_{ne} \times IR \quad (A6)$$

Cost of Illness (COI) includes the total costs incurred, such as the cost of drugs, travel, hospitalization, and lost days.

Appendix A2. Mortality Costs

$$Mortality\ damages\ (USD) = VSL \times I_{ne} \times IR \quad (A7)$$

The value of a statistical life (VSL) is a local tradeoff between death risk and money. When tradeoff values are derived from decisions in market contexts, VSL serves as a measure of the population's willingness to pay for risk reduction and the marginal cost of increasing safety. Factors such as income levels and population perceptions determine VSL, so it can reveal important differences across countries [61].

6. REFERENCES

1. Abdallah, T. Chapter 4—Environmental Impacts. In *Sustainable Mass Transit*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2017. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811299-1.00004-6>.
2. Statistics Canada. Human Activity and the Environment: Measuring Ecosystems Goods and Services in Canada. 2013. Available online: <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/16-201-x/16-201-x2013000-eng.pdf> (accessed on 5 February 2023).
3. Basuki, B.; Irwanda, R.D. Environmental cost analysis and reporting to measure environmental performance in realizing eco-efficiency at PT Industri Kereta Api (Persero). *AJAR* **2018**, 3, 169–180. <https://doi.org/10.1108/ajar-06-2018-0013>.

4. Filho, W.L.; Setti, A.F.F.; Azeiteiro, U.M.; Lokupitiya, E.; Donkor, F.K.; Etim, N.N.; Matandirotya, N.; Olooto, F.M.; Sharifi, A.; Nagy, G.J.; et al. An overview of the interactions between food production and climate change. *Sci. Total Environ.* **2022**, *838*, 156438. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156438>.
5. NGS. Environmental Impacts of Agricultural Modifications. 2022. Available online: <https://education.nationalgeographic.org/resource/environmental-impacts-agricultural-modifications/> (accessed on 6 February 2023).
6. Tanentzap, A.J.; Lamb, A.; Walker, S.; Farmer, A. Resolving Conflicts between Agriculture and the Natural Environment. *PLoS Biol.* **2015**, *13*, e1002242. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002242>.
7. Ritchie, H.; Roser, M. Environmental Impacts of Food Production. Our World in Data. 2022. Available online: <https://ourworldindata.org/environmental-impacts-of-food> (accessed on 17 February 2023).
8. Chen, J. Environmental Economics: Definition, Importance, and Example. Investopedia. 2022. Available online: <https://www.investopedia.com/terms/e/environmental-economics.asp> (accessed on 16 February 2023).
9. Morrissey, K. Resource and Environmental Economics. *Int. Encycl. Hum. Geogr.* **2020**, 463–466. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102295-5.10755-3>.
10. Hardin, G. The Tragedy of the Commons. *Science* **1968**, *162*, 1243–1248. Available online: <http://www.jstor.org/stable/1724745> (accessed on 5 February 2023).
11. Cristeche, E.; Penna, J.A. Métodos de Valoración Económica de los Servicios Ambientales. 2008. Available online: https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-metodos_doc_03.pdf (accessed on 21 February 2023).
12. Guzmán, C. ¿Cómo se mide el Impacto Ambiental? Centro Europeo de Posgrado (CEUPE). 2022. Available online: <https://www.ceupe.mx/blog/como-se-mide-el-impacto-ambiental.html> (accessed on 16 February 2023).
13. WHO. An Estimated 12.6 Million Deaths Each Year Are Attributable to Unhealthy Environments. 2016. Available online: <https://www.who.int/news/item/15-03-2016-an-estimated-12-6-million-deaths-each-year-are-attributable-to-unhealthy-environments> (accessed on 16 February 2023).
14. PRI; UNEP FI. Universal Ownership: Why Environmental Externalities Matter to Institutional Investors. 2010. Available online: https://www.unepfi.org/fileadmin/documents/universal_ownership_full.pdf (accessed on 10 February 2023).

15. OASH. Healthy People 2030. 2020. Available online: <https://health.gov/healthypeople/objectives-and-data/browse-objectives/environmental-health> (accessed on 7 February 2023).
16. Bond, T.C.; Doherty, S.J.; Fahey, D.W.; Forster, P.M.; Berntsen, T.; DeAngelo, B.J.; Flanner, M.G.; Ghan, S.; Kärcher, B.; Koch, D.; et al. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *J. Geophys. Res. Atmos.* **2013**, *118*, 5380–5552. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>.
17. World Bank. *The Global Health Cost of PM2.5 Air Pollution: A Case for Action Beyond 2021 (International Development in Focus)*; The World Bank: Washington, DC, USA, 2022. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1816-5>.
18. Maji, K.J.; Dikshit, A.K.; Deshpande, A. Assessment of City Level Human Health Impact and Corresponding Monetary Cost Burden due to Air Pollution in India Taking Agra as a Model City. *Aerosol Air Qual. Res.* **2017**, *17*, 831–842. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2016.02.0067>.
19. WWF. Sugar and the Environment: Encouraging Better Management Practices in Sugar Production. 2005. Available online: https://wwf.panda.org/wwf_news/?22255/Sugar-and-the-Environment-Encouraging-Better-Management-Practices-in-Sugar-Production-and-Processing (accessed on 3 March 2023).
20. Bartocci Liboni, L.; Oranges Cezarino, L. Impactos sociais e ambientais da indústria da cana-de-açúcar. *Future Stud. Res. J.* **2012**, *4*, 202–230. <https://doi.org/10.24023/futurejournal/2175-5825/2012.v4i1.101>.
21. Filoso, S.; Carmo, J.B.D.; Mardegan, S.F.; Lins, S.R.M.; Gomes, T.F.; Martinelli, L.A. Reassessing the environmental impacts of sugarcane ethanol production in Brazil to help meet sustainability goals. *Renew. Sust. Energ. Rev.* **2015**, *52*, 1847–1856. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.012>.
22. El Chami, D.; Daccache, A.; El Moujabber, M. What are the impacts of sugarcane production on ecosystem services and human well-being? A review. *Ann. Agric. Sci.* **2020**, *65*, 188–199. <https://doi.org/10.1016/j.aoas.2020.10.001>.
23. Gutiérrez, C. How Sugarcane Production Harms Wild Animals. 2022. Available online: <https://faunalytics.org/sugarcane-how-it-harms-wildlife/> (accessed on 18 February 2023).
24. FAO. Crops and Livestock Products. 2022. Available online: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL> (accessed on 29 January 2023).
25. CONADESUCA. Reportes. 2022. Available online: <https://www.gob.mx/conadesuca/acciones-y-programas/sistema-infocana> (accessed on 17 February 2023).

26. SIAP. Producción Agrícola. Cierre de la Producción Agrícola. 2022. Available online: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (accessed on 17 February 2023).
27. Napurí, C.G. ¿Qué son los Costos de Transacción? Aplicación del Teorema de Coase. 2022. Available online: <https://blogposgrado.ucontinental.edu.pe/costos-transaccion-teorema-coase> (accessed on 5 February 2023).
28. Reyes Pérez, O.; Vázquez Solís, V.; Reyes Hernández, H.; Nicolás Caretta, M.; Rivera González, J.G. Potencial turístico de la región Huasteca del estado de San Luis Potosí, México. *Econ. Soc. y Territ.* **2012**, *12*, 249–275. Available online: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=11122403009> (accessed on 8 February 2023).
29. Maji, K.J.; Ye, W.F.; Arora, M.; Shiva Nagendra, S. PM_{2.5}-related health and economic loss assessment for 338 Chinese cities. *Environ. Int.* **2018**, *121*, 392–403. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.09.024>.
30. Bherwani, H.; Nair, M.; Musugu, K.; Gautam, S.; Gupta, A.; Kapley, A.; Kumar, R. Valuation of air pollution externalities: Comparative assessment of economic damage and emission reduction under COVID-19 lockdown. *Air Qual. Atmos. Health* **2020**, *13*, 683–694. <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00845-3>.
31. DOF. NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021, Salud Ambiental. Criterio para Evaluar la Calidad del aire Ambiente, con Respecto a las Partículas Suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5}. Valores Normados para la Concentración de Partículas Suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire Ambiente, como Medida de Protección a la Salud de la Población. 2021. Available online: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633855&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0 (accessed on 27 May 2023).
32. DOF. NORMA Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019, Lineamientos para la Obtención y Comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud. 2019. Available online: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5579387&fecha=20/11/2019#gsc.tab=0 (accessed on 27 May 2023).
33. INEGI. Censo de Población y Vivienda 2020. 2021. Available online: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/> (Accessed on 8 March 2023).
34. SMA. Fuentes de Emisión de Carbono Negro en el Estado de México. 2010. Available online: https://sma.edomex.gob.mx/sites/sma.edomex.gob.mx/files/files/sma_pdf_fuen_carbono_ne.pdf (accessed on 2 March 2023).
35. Rojas, I.; Montero, S. Nota sobre la Estimación del Valor de una vida Estadística en México. 2021. Available online: <http://www.aire.cdmx.gob.mx/descargas/publicaciones/flippingbook/proaire2021-2030> (accessed on 20 January 2023).

36. WB. GDP per capita (current US\$)—Mexico. 2023. Available online: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD?locations=MX> (accessed on 22 January 2023).
37. Google. Google Finance: Stock Market Prices, Real-time Quotes & Business News. 2023. Available online: <https://www.google.com/finance/?ucbcb=1> (accessed on 28 February 2023).
38. The Mexico Air Quality Management Team. *Improving Air Quality in Metropolitan Mexico City: An Economic Valuation*; Policy Research Working Papers; The World Bank: Washington, DC, USA, 2022. <https://doi.org/10.1596/1813-9450-2785>.
39. Quist, Z. Life Cycle Assessment (LCA)—Complete Beginner's Guide. Ecochain—LCA Software Company. 2019. Available online: <https://ecochain.com/knowledge/life-cycle-assessment-lca-guide/> (accessed on 28 February 2023).
40. Eurofins. Análisis de Ciclo de Vida (ACV): Qué es y para qué sirve. 2021. Available online: <https://envira.es/es/analisis-de-ciclo-de-vida/> (accessed on 1 March 2023).
41. Hillege, L. Impact Categories (LCA)—Overview. 2019. Available online: <https://ecochain.com/knowledge/impact-categories-lca/> (accessed on 27 February 2023).
42. Korteland, M.; De Bruyn, S. Shadow Prices Handbook: Valuation and Weighting of Emissions and Environmental Impacts. CE Delft. 2010. Available online: <https://cedelft.eu/publications/shadow-prices-handbook-valuation-and-weighting-of-emissions-and-environmental-impacts/> (accessed on 12 March 2023).
43. EBRD. Methodology for the Economic Assessment of EBRD Projects with High Greenhouse Gas Emissions: Technical Note. 2019. Available online: <https://www.ebrd.com/news/publications/institutional-documents/methodology-for-the-economic-assessment-of-ebrd-projects-with-high-greenhouse-gasemissions.html> (accessed on 5 February 2023).
44. Hillege, L. Environmental Cost Indicator (ECI): Overview. 2019. Available online: <https://ecochain.com/knowledge/environmental-cost-indicator-eci/> (accessed on 7 March 2023).
45. Ecochain. Empowering for Environmental Impact. 2023. Available online: <https://ecochain.com/> (accessed on 7 March 2023).
46. Ridley, C.E.; Clark, C.M.; Le Duc, S.D.; Bierwagen, B.G.; Lin, B.B.; Mehl, A.; Tobias, D.A. Biofuels: Network Analysis of the Literature Reveals Key Environmental and Economic Unknowns. *EST* **2012**, *46*, 1309–1315. <https://doi.org/10.1021/es2023253>.

47. Degefa, S.; Saito, O. Assessing the Impacts of Large-Scale Agro-Industrial Sugarcane Production on Biodiversity: A Case Study of Wonji Shoa Sugar Estate, Ethiopia. *Agriculture* **2017**, *7*, 99. <https://doi.org/10.3390/agriculture7120099>.
48. Mugica Álvarez, V.; Hernández Rosas, F.; Magaña Reyes, M.; Herrera Murillo, J.; De la Rosa, N.S.; Gutiérrez Arzaluz, M.; Figueroa Lara, J.; González Cardoso, G. Sugarcane burning emissions: Characterization and emission factors. *Atmos. Environ.* **2018**, *193*, 262–272. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.013>.
49. Umrit, G.; Cheong, R.M.T.; Gillabel, J.; Merckx, R. Effect of conventional versus mechanized sugarcane cropping systems on soil organic carbon stocks and labile carbon pools in Mauritius as revealed by ¹³C natural abundance. *Plant. Soil.* **2014**, *379*, 177–192. <https://doi.org/10.1007/s11104-014-2053-5>.
50. De Oliveira Cardoso, M.S.; Pedrosa, E.M.R.; Rolim, M.M.; De Oliveira, L.S.B.; Santos, A. Relationship between nematode assemblages and physical properties across land use types. *Trop. Plant. Pathol.* **2016**, *41*, 107–114. <https://doi.org/10.1007/s40858-016-0075-7>.
51. Satiro, L.S.; Cherubin, M.R.; Safanelli, J.L.; Lisboa, I.P.; Rocha Junior, P.R.D.; Cerri, C.E.P.; Cerri, C.C. Sugarcane straw removal effects on Ultisols and Oxisols in south-central Brazil. *Geoderma Reg.* **2017**, *11*, 86–95. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2017.10.005>.
52. Allan, H.L.; Van De Merwe, J.P.; Finlayson, K.A.; O'Brien, J.T.; Mueller, J.F.; Kookana, R.S. Analysis of sugarcane herbicides in marine turtle nesting areas and assessment of risk using in vitro toxicity assays. *Chemosphere* **2017**, *185*, 656–664. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.07.029>.
53. Du, C.; Kulay, L.A.; Cavalett, O.; Dias, L.C.; Freire, F. Life cycle assessment addressing health effects of particulate matter of mechanical versus manual sugarcane harvesting in Brazil. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2018**, *23*, 787–799. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1334-7>.
54. Ribeiro Palacios, M. Land Use Change in Southern Huasteca, Mexico; Drivers and Consequences for Livelihood and Ecosystem Services. Ph.D. Thesis, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C., San Luis Potosí, México, 2012.
55. Flores-Jiménez, D.E.; Algara-Siller, M.; Aguilar-Rivera, N.; Carbajal, N.; Aldama-Aguilera, C.; Ávila-Galarza, A.; Álvarez-Fuentes, G. Influence of Sugarcane Burning on Soil Carbon and Nitrogen Release under Drought and Evapotranspiration Conditions in a Mexican Sugarcane Supply Zone. *Rev. Int. Contam. Ambie.* **2016**, *32*, 177–189. <https://doi.org/10.20937/rica.2016.32.02.04>.
56. Baez-Gonzalez, A.D.; Kiniry, J.; Meki, M.N.; Williams, J.R.; Silva, M.Á.; Gonzalez, J.L.R.; Estala, A.M. Potential impact of future climate change on sugarcane under

dryland conditions in Mexico. *J. Agron. Crop. Sci.* **2018**, *204*, 515–528. <https://doi.org/10.1111/jac.12278>.

57. Xie, Y.; Dai, H.; Dong, H.; Hanaoka, T.; Masui, T. Economic Impacts from PM_{2.5} Pollution-Related Health Effects in China: A Provincial-Level Analysis. *EST* **2016**, *50*, 4836–4843. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05576>.
58. Junqueira, T.L.; Cavalett, O.; Bonomi, A. The Virtual Sugarcane Biorefinery—A Simulation Tool to Support Public Policies Formulation in Bioenergy. *Ind. Biotechnol.* **2016**, *12*, 62–67. <https://doi.org/10.1089/ind.2015.0015>.
59. WHO. WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM_{2.5} and PM₁₀), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide. 2021. Available online: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228> (accessed on 28 February 2023).
60. WHO. Joint Effects of Air Pollution Data by Country. 2022. Available online: <https://apps.who.int/gho/data/view.main.SDGAIRBOD392v?lang=en> (accessed on 25 January 2023).
61. Kniesner, T.J.; Viscusi, W.K. The Value of a Statistical Life. *SSRN Electron. J.* **2019**. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3379967>.

ANEXOS

1. PROCESO DE PRODUCCIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR

1. Cultivo

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) es una planta herbácea, perenne, perteneciente a la familia de las poaceas o gramíneas, el grupo de plantas de mayor importancia económica en el mundo, debido a su contribución de forma directa o indirecta en la vida de los seres humanos (Mugica, 2016). A este grupo también pertenecen el trigo, el maíz, el arroz, el sorgo, la cebada, la avena y el centeno (Judd et al., 2015). Además, del tradicional uso de este cultivo con fines alimenticios, en los últimos años, y gracias a las investigaciones que se han realizado, se han encontrado usos alternativos para sus derivados que van desde los biocombustibles y la cogeneración de energía, hasta la producción de recipientes desechables biodegradables y juguetes (Cervantes, García, Bermúdez y Vizcaíno, 2017), y las tendencias indican que su desarrollo futuro estará orientado hacia los productos con mayor valor agregado (FAO, 2017).

1.1. Características botánicas

La caña de azúcar desarrolla dos tipos de **tallo**: el subterráneo o rizoma y el aéreo, que es el que se aprovecha para la extracción del azúcar.

El tallo aéreo se desarrolla a partir de yemas, mediante la propagación asexual o vegetativa de esquejes, que al desarrollarse dan paso a la formación de un nuevo tallo, que se denomina tallo primario. Este a su vez, movilizará las yemas de su porción basal, dando origen a los tallos secundarios (ECURED, 2010).

Sus **hojas** son largas, lanceoladas y fibrosas, con bordes dentados y una nervadura central gruesa. Miden entre 30 y 60 centímetros de longitud y alrededor de 5 centímetros de ancho (SAGARPA, 2017).

Desarrolla **panículas**, un tipo de inflorescencia, en la que se alojan espiguillas de flores minúsculas y en cuyos extremos se aprecia una especie de pelusa larga y sedosa (Bioenciclopedia, 2015).

Las **flores** son hermafroditas y son polinizadas por el viento; sin embargo, al ser una especie cultivada por sus tallos y no por sus frutos, puede propagarse sin necesidad de polinización (Bioenciclopedia, 2015).

El **sistema radicular** se divide en dos tipos: el primero conocido como adventicio, se forma a partir del anillo radicular del esqueje plantado y tiene como función absorber agua del medio para facilitar la hidrólisis de los glúcidos contenidos en el entrenudo, que servirán para nutrir el nuevo vástago hasta que éste establezca relaciones con el medio en el cual se desarrollará. El otro tipo de raíz, el permanente, es un sistema nodal y

fasciculado, que puede presentar varias caracterizaciones de sostén y absorción (ECURED, 2010).

1.2. Etapas del cultivo

La caña de azúcar tiene cuatro fases de crecimiento: Establecimiento; ahijamiento, fase formativa o de reposo fisiológico; crecimiento rápido y, maduración y cosecha.

El periodo de **establecimiento** contempla la germinación y emergencia de la planta y dura de 30 a 50 días (50 días después a la siembra), posterior a la siembra. La germinación se refiere al periodo inicial de crecimiento de la planta, a partir de las yemas presentes en los tallos plantados o en los que quedan en pie después de la cosecha del cultivo anterior. En esta fase la humedad, la temperatura, la estructura y porosidad del suelo, la sanidad y el estado nutricional de los esquejes, son factores que resultarán determinantes y decisivos para el desarrollo de las etapas posteriores (Aguilar, 2011).

El **crecimiento vegetativo, macollamiento o ahijamiento**, elongación del tallo y cierre de la plantación dura de 50 a 70 días (120 días después la siembra). Una temperatura cercana a 30°C es considerada como óptima para el ahijamiento (el proceso fisiológico de ramificación subterránea múltiple, que le da al cultivo un número adecuado de hojas activas y tallos, que permiten obtener un buen rendimiento) (Aguilar, 2011).

El **crecimiento rápido e incremento del rendimiento** dura entre 180 y 220 días (340 días después de la siembra). Comprende desde el cierre del dosel hasta el inicio del periodo de madurez de los tallos. Se caracteriza por el aumento de biomasa y del número de tallos por área. En esta etapa ocurre la estabilización de los retoños, donde sólo de un 40% a un 50% sobrevive y alcanza el estado adulto. Además, se presenta un crecimiento rápido de los tallos con la formación de 4 a 5 nudos por mes, así como una foliación frecuente y rápida hasta alcanzar un Índice de Área Foliar (IAF) de 6 a 7 (Barbieri, 1993).

La **maduración y sazonado**, es una etapa compuesta de dos fases que se presenta tarda entre 60 y 140 días (480 días después de la siembra). Requiere un bajo contenido de humedad en el suelo ya que la acumulación de carbohidratos y la conversión de azúcares reductores es preponderante. La maduración de la caña ocurre de abajo hacia arriba (desde la base hacia el ápice); por esta razón la base contiene más azúcares que la parte superior de la planta. Contrario a los requerimientos de humedad y altas temperaturas de las otras etapas, durante la maduración y sazonado, aquí se requiere idealmente condiciones de abundante luminosidad, cielos claros, noches frescas y días calurosos (es decir, con mayor variación diaria de temperatura) y climas secos para estimular la maduración (CONADESUCA, 2015).

La **cosecha** se realiza entre los 16 y los 18 meses posteriores a la siembra, mediante un corte en la base del tallo, de forma manual o mecánica. La paja se elimina manualmente o es quemada previamente a la cosecha, antes de la floración (Torres y Acosta, 2015). Esta etapa se traslapa cíclicamente entre los ciclos plantilla, soca y resoca y determina

el calendario de los periodos de zafra y no zafra azucarera, así como las actividades de campo. El cultivo se considera perenne, aunque la viabilidad económica dura menos tiempo que la técnica, ya que muestra rendimientos decrecientes a lo largo de las cosechas (Figura 1).

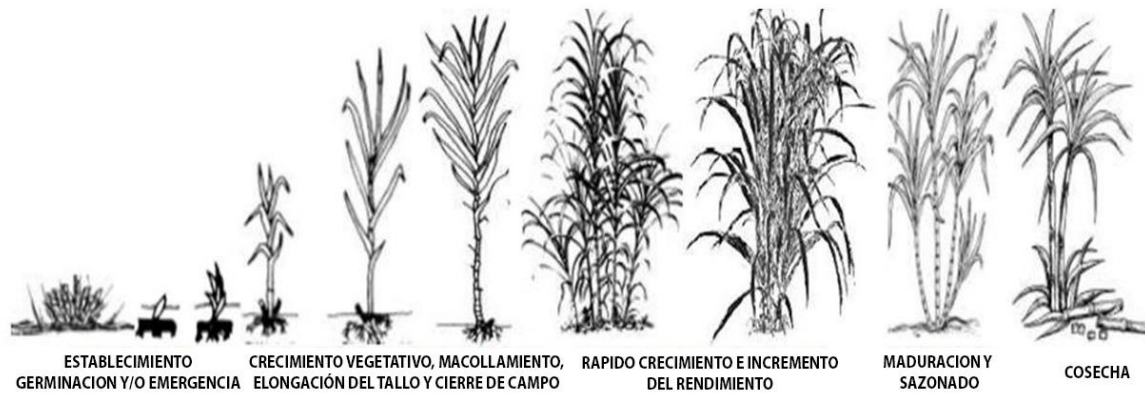


Figura 1. Etapas fenológicas de la caña de azúcar

Fuente: ANEC, 2018.

1.3. Manejo agronómico

Según FIRA en 2010, en México, las prácticas agrícolas de producción de caña de azúcar se caracterizan por labores de preparación de suelos sin un manejo adecuado de residuos y un trazo de surcos en el mismo sentido de la pendiente del suelo, lo que provoca erosión y degradación.

Adicionalmente, el riego se aplica en láminas pesadas y en forma irregular; en la fertilización no se considera el nivel de nutrientes del suelo y la nutrición requerida por el cultivo para su producción potencial. Asimismo, para el control de plagas, enfermedades y malezas predomina el uso indiscriminado de agroquímicos.

Aunque la recomendación es realizar de 4 a 5 cortes para mantener la rentabilidad de la plantación, en promedio se realizan de 7 a 9 cosechas, y en algunos casos se han identificado cepas de más de 15 años.

Un factor adicional que enmarca la baja productividad nacional de la caña de azúcar lo constituye el establecimiento de pocas variedades, mismas que cuentan con hasta 60 años de haber sido liberadas (70% de la superficie nacional se encuentra cultivada con las siguientes 3 variedades: CP 72-2086 (36%); Mex 69-290 (29%) y Mex 79-431 (9%) (CONADESUCA, 2016); lo anterior sin mencionar que el material vegetativo que se utiliza en las siembras proviene de plantaciones comerciales y no de semilleros (Sentíes-Herrera, Gómez-Merino y Loyo-Joachin, 2016).

1.3.1. Preparación del terreno

Prácticamente en toda la superficie nacional destinada al cultivo de la caña de azúcar, las labores de la preparación del terreno se realizan de forma mecánica (CONADESUCA y UACH, 2017). Sólo en el caso donde las condiciones del terreno no permiten el uso de maquinaria, se continúa utilizando la yunta (Figura 2).



Figura 2. Labores de preparación del terreno para el cultivo de caña de azúcar en Ciudad Valles, San Luis Potosí.

Con esta práctica, se pretende fundamentalmente adicionar porosidad y aireación al suelo para una buena germinación de los tallos o esquejes, para permitir la emergencia de las plantas y desarrollar correctamente de las raíces (INIFAP, 2005). Por lo tanto, consiste en el ablandamiento de una capa superficial del suelo (generalmente de 30 a 40 centímetros) mediante la manipulación física con implementos apropiados; la incorporación de residuos de cosechas anteriores; la adición de abonos; la eliminación de malezas, y la destrucción de estadios hibernantes de plagas y enfermedades (FIRA, 2010).

a) Primer rastreo

El Comité Estatal del Sistema Producto Caña de Azúcar del Estado de San Luis Potosí (2013) en su Plan Rector, establece como primera labor un primer rastreo a dos pasos, después de una cosecha. El primer paso se realizará de forma perpendicular a la dirección del último barbecho y el segundo paso, en sentido opuesto al anterior. Esta labor contribuye a la pulverización de terrones y cepas del cultivo anterior, así como a la nivelación del suelo. Otras instituciones como FIRA e INIFAP, omiten esta labor en sus recomendaciones.

b) Subsoleo

Generalmente, esta es la primera labor del cultivo; aunque en algunos casos, cuando se tiene problemas de plagas del suelo, se realizan programas de volteo, que exponen por más tiempo las capas del suelo a la intemperie (CONADESUCA y UACH, 2017).

En el caso de la caña de azúcar, se recomienda realizar el subsoleo a una profundidad de 50 centímetros, para evitar la compactación, por el propio paso de la maquinaria, además de permitir la incorporación de la materia orgánica y otros elementos presentes en el suelo; lo anterior permite que las raíces de la nueva planta de caña se desarrollen normalmente (FIRA, 2010).

c) Barbecho

La recomendación es realizar esta labor cuando la humedad presente en el suelo provoca problemas en la operación de la maquinaria, o cuando el suelo seco dificulta la penetración de los implementos (FIRA, 2010).

Suele realizarse con arado de disco o vertedera, a dos pasos cruzados de arado, para romper y fragmentar el suelo entre 35 y 40 centímetros de profundidad (Cervantes, García, Bermúdez y Vizcaíno, 2017). El barbecho contribuye a la eliminación de malezas y proporciona condiciones de emergencia a la semilla, además de facilitar el desarrollo radicular de la planta (Comité Estatal del Sistema Producto Caña de Azúcar del Estado de San Luis Potosí, 2013).

d) Segundo rastreo

Se trata de una labor secundaria, a dos o tres pasos (FIRA, 2010), para deshacer la mayor cantidad de terrones que se forman durante el primer y segundo barbecho, logrando con ello un suelo completamente mullido, ideal para la siembra (Cervantes, García, Bermúdez y Vizcaíno, 2017).

e) Nivelado del terreno

Se trata del emparejamiento de la superficie del suelo para darle un gradiente de pendiente adecuado, a forma de drenar los excesos de agua que se pueden suscitar por riego o lluvia y hacer más uniforme la distribución de la humedad (FIRA, 2010; Comité Estatal del Sistema Producto Caña de Azúcar del Estado de San Luis Potosí, 2013).

f) Surcado

Es la última labor en la preparación del suelo previo a la siembra. Se recomienda trazar los surcos de oriente a poniente para una mejor exposición al sol; que éstos sean rectos

y lo más largo posibles para hacer más eficiente la cosecha mecanizada. La distancia del surco normal va de 1.20 a 1.40 metros de ancho. No obstante, si se ha considerado la instalación de un sistema de riego por goteo, lo más recomendable es el surco australiano o tipo piña, el cual consiste en hacer un surco a una distancia de 1.40 metros y después dos surcos a una separación de 0.6 metros (Cervantes, García, Bermúdez y Vizcaíno, 2017).

En el centro de los surcos se instala una manguera, cuando se realiza fertiriego, a una profundidad de 0.2 metros, con el propósito de minimizar daños provocados por el fuego al momento de quemar la caña, así como los de la maquinaria y equipo (INIFAP, 2005).

1.3.2. Siembra

La época de siembra depende de diversos factores; por una parte, se consideran los que determinan la germinación de las yemas: temperatura y humedad del suelo; mientras que, por otra parte, también es necesario tomar en cuenta los días de maduración de las variedades. No obstante, en el estado de San Luis Potosí, lo común es que se siembre de junio a octubre, considerando que la mayor parte de la superficie es de temporal (Comité Estatal del Sistema Producto Caña de Azúcar del Estado de San Luis Potosí, 2013).

a) Semilla (material vegetativo)

En México, lo más común es sembrar los tallos enteros de caña al fondo del surco, a cordón sencillo o doble y posteriormente se hacen trozos de entre 3 y 5 yemas (Figura 3). Sin embargo, se han realizado experimentos que indican que el porcentaje de germinación de tallos con 3 yemas es el más alto. Los tallos deben provenir de semilleros que tengan entre 7 a 10 meses de edad en ciclo de plantilla, y sembrarse recién cortados para que contengan alto contenido de agua y reservas de nutrientes (FIRA, 2010).



Figura 3. Siembra de caña de azúcar en Ciudad Valles, San Luis Potosí.

La cantidad de semilla por hectárea dependerá de la separación entre surcos, del peso de los tallos y del método de siembra. Generalmente, se requieren entre 10 y 12 toneladas por hectárea para surco sencillo. Para surco doble o tipo piña, se requieren de 15 a 18 toneladas por hectárea (Cervantes, García, Bermúdez y Vizcaíno, 2017).

b) Tape de semilla

Es importante que posterior a la siembra, se tape la semilla para evitar que ésta se deshidrate. El tapado puede realizarse de forma manual o mecánica, cuidando que la capa sobre la semilla no sobrepase los 7 centímetros, para que no dificulte la emergencia de las plantas (Comité Estatal del Sistema Producto Caña de Azúcar del Estado de San Luis Potosí, 2013). Cuando la emergencia no es uniforme, se recomienda realizar una resiembra para no ver reducidos los rendimientos en la cosecha (Cervantes, García, Bermúdez y Vizcaíno, 2017).

1.3.3. Fertilización

El común denominador es que se realice con fórmulas preestablecidas; la recomendación del Ingenio Plan de San Luis para los terrenos que lo abastecen es una fórmula 20-10-10 (N-P-K) con una dosis de 700 kilogramos por hectárea, en tanto que el Ingenio Plan de Ayala utiliza la misma fórmula a una dosis de 500 kilogramos por hectárea. Por su

parte, San Miguel del Naranjo y Alianza Popular utilizan diferentes fórmulas y dosis para los distintos tipos de plantación.

Hay que resaltar que el uso indiscriminado de fertilizantes nitrogenados no sólo incide directamente en los costos de producción, sino que también tiene efectos negativos para el ambiente y la producción, como la acidificación del suelo.

1.3.4. Riego

La recomendación técnica indica que se deben realizar de 3 a 5 riegos, dependiendo de la temporada de lluvias. El primer riego se realiza al momento de la siembra y los posteriores, de acuerdo con las condiciones de humedad del suelo. La tendencia actual es sustituir los motores de diésel por eléctricos que reducen los costos; además hay que agregar a los costos, las cuotas de uso de agua y la inversión en la instalación de medidores a los equipos de bombeo que exige la Comisión Nacional del Agua (CNA), para cuantificar el volumen utilizado.

Los sistemas de riego más utilizados son el riego con cañón fijo y viajero, el de aspersión y el riego rodado por gravedad. En muy pocos casos se realiza la fertirrigación, a pesar de su eficiencia.

Hay que mencionar que en el caso de San Luis Potosí, sólo 25% de la superficie cañera cuenta con riego, lo que constituye un factor determinante para su baja productividad (SADER y CONADESUCA, 2019).

1.3.5. Control de malezas

Ante la presencia de zacates, coquillos y otras malezas, se realiza control manual o mecánico, casi siempre con productos químicos (90% de los casos), con activos como las aminas y los glifosatos (pese a la actual controversia que existe por el uso de estos últimos).

1.3.6. Control de plagas

En el mismo sentido, cuando se presentan plagas como la mosca pinta o salivazo, el gusano barrenador, la rata cañera o la langosta, se recurre a diversos métodos para su control.

La mosca pinta se previene con prácticas culturales como la rastra sanitaria y la limpieza de malezas. En algunos casos se utilizan las trampas verdes, pero el control principal se realiza con insecticidas a base de cipermetrina. Asimismo, se comienza a utilizar el control biológico con depredadores naturales, hongos y cintas adhesivas, entre otros (Cruz-Guevara y Carrillo-Inungaray, 2015).

El gusano barrenador puede controlarse de forma preventiva mediante una buena preparación del terreno, la eliminación manual de tallos dañados, la selección de

variedades resistentes y los insecticidas o el control biológico (*Tricogramma pretiosum* y el hongo *Metarhizium sp.*) (Hernández y Figueroa, 2011).

La rata cañera, una plaga de menor importancia económica, se puede combatir con rodenticidas en cebos envenenados con difasinona, fosfuro de zinc y carbofuran, entre otros.

1.3.7. Control de enfermedades

Las enfermedades que afectan a la caña de azúcar más allá de reducir sus rendimientos, inciden de forma negativa en la calidad de la producción: disminuyen los grados Brix, la sacarosa, la pureza de los jugos y el azúcar recuperable. La mancha de ojo, raya roja, pokkah boeng, mosaico, roya, carbón, escaldadura de la hoja y amarillamiento de la hoja son controlados con el establecimiento de variedades tolerantes o resistentes y con la desinfección de las semillas (CONADESUCA, 2005).

1.3.8. Cosecha

Debido a la indisoluble relación que existe entre la producción y la industrialización de la caña de azúcar, las plantaciones se planean de tal forma que puedan abastecer a los ingenios durante aproximadamente 6 meses (180 a 190 días) de cada año. Dos o tres meses antes de la cosecha, se realizan muestreos para hacer análisis de campo y laboratorio. El índice de madurez se determina con el porcentaje de humedad, grados Brix, cantidad de sacarosa, pureza del jugo y azúcares reductores.

El corte se realiza entre los 11 y los 16 meses de la plantación, cuando se detiene el desarrollo de los tallos, las hojas se marchitan y caen y la corteza de la capa se vuelve quebradiza. Aunque existe una tendencia a nivel mundial de cosecha en verde en aras de una producción más limpia, en México más del 70% de la producción se sigue cosechando por el método de doble quema.

Previo a la cosecha se realiza la quema con el objetivo de eliminar las malezas que impiden el corte de la caña y posibles plagas como ratas de campo, víboras o tuzas que pudieran dañar a los cortadores. Una vez cortada, la caña se apila en el campo para posteriormente ser recogida de forma para su posterior transporte al Ingenio. Aunque en algunos casos esta labor se realiza de forma mecánica, en México mayoritariamente se hace de forma manual (SADER, 2019).

Después de la cosecha se realiza la segunda quema, en esta ocasión con el objetivo de eliminar restos de plagas y enfermedades y porque en general, se considera que esta práctica incrementa la fertilidad del suelo, aunque diversas investigaciones han mostrado que a largo plazo, ocurre todo lo contrario, pues cuando se realizan las quemas, además de generar contaminación del aire, se afecta la biodiversidad y el ecosistema, se disminuye la fertilidad natural del suelo, se destruye la actividad microbiológica del suelo, se afecta la salud de la población humana expuesta, se ponen en riesgo otros cultivos y

áreas naturales, provoca pérdida de la humedad y erosión del suelo, e incluso reduce la calidad de la producción, entre otros efectos (Weyslab, 2018).

Algunos ingenios han comenzado a fomentar labores en pro de la sustentabilidad como el ahilado de paja para mejorar la uniformidad del brote y rebrote, después de las cosechas (Figura 4).



Figura 4. Ahiladora y desmenuzadora para agricultura regenerativa de caña de azúcar en Ciudad Valles, San Luis Potosí.

2. Industrialización

Históricamente, la caña de azúcar se ha utilizado principalmente para hacer azúcar, aunque en los últimos años, algunos países productores han tomado el camino de la diversificación, tratando de evadir la volatilidad de sus precios.

Un claro ejemplo es Brasil que ha incursionado exitosamente en la producción de biocombustible y actualmente tiene la infraestructura suficiente para producir azúcar o bioetanol, dependiendo de las condiciones de mercado.

Los usos de la caña de azúcar se pueden dividir en cuatro grandes grupos: alimento humano y pecuario, alcoholes, sucroquímicos farmacéuticos y otros. Dentro de los usos

industriales de la caña de azúcar destaca la elaboración de azúcar y piloncillo, jugos y bebidas, insumos para dietas pecuarias, etanol, aguardiente y meladura, entre otros. No obstante, de cada uno de los derivados de la caña de azúcar, se pueden obtener varios productos más (Figura 5).

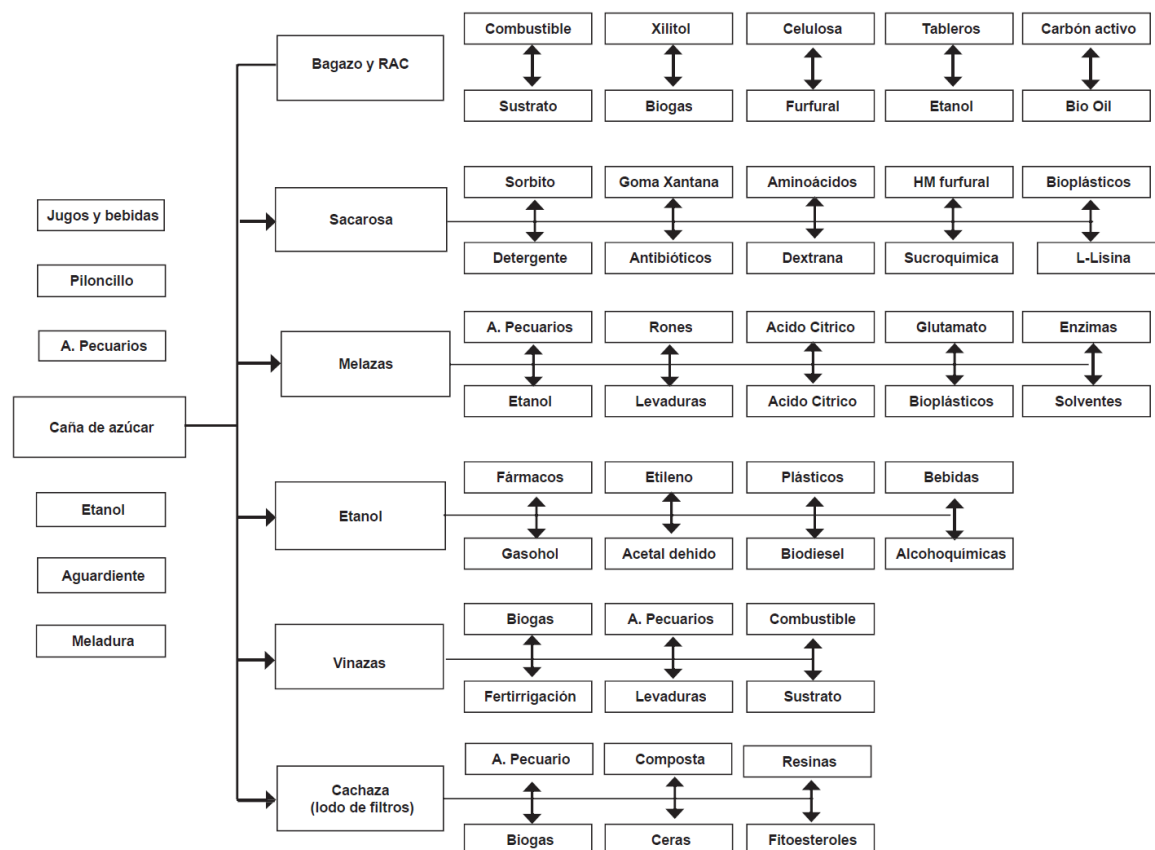


Figura 5. Derivados de la industria azucarera.

Fuente: Aguilar-Rivera, 2009.

En México, menos del 1% de la producción se destina a fines distintos al industrial y entre los usos industriales la elaboración de azúcar de diferentes calidades continúa siendo el principal producto obtenido de la caña (SIAP, 2022).

Las fábricas que procesan, transforman e industrializan la caña de azúcar para convertirla en azúcar se conocen como ingenios azucareros. En nuestro país, varios de los ingenios que subsisten hasta nuestros días provienen de la época del porfiriato y la mayoría de ellos tuvieron su última renovación estructural en la década de los setenta, durante la Revolución Industrial.

El proceso de producción de azúcar se puede resumir en nueve etapas: corte de la caña, molienda, generación de vapor, calentamiento, clarificación, filtración, evaporación, cristalización, evaporado y secado.

2.1. Molienda y generación de vapor

En esta etapa se lava, se corta y se tritura mecánicamente la caña de azúcar. Ya triturada, la caña se mezcla en repetidas ocasiones con agua mientras pasa por los rodillos de los molinos. Con este proceso se logra extraer 93% del jugo contenido en las cañas y éste contiene entre 10 y 15 grados Brix. El bagazo o fibras residuales se utilizan principalmente como combustible para el propio ingenio y sólo el excedente sirve como alimento pecuario, para la producción de papel o para la generación de energía eléctrica. El agua y el jugo debilitado del último molino se adicionan para suavizar la caña y ayudar en la extracción.

2.2. Calentamiento

El objetivo fundamental de esta etapa es llevar el jugo de 16 a 17 grados Brix elevando su temperatura a través de múltiples calentadores.

2.3. Sulfatación y Clarificación

El siguiente paso es adicionar dióxido de azufre (SO_2) al jugo extraído para eliminar impurezas y decolorarlo para poder darle al azúcar su característico color blanco. En el mismo sentido, posteriormente se le agrega cal al jugo resultante para precipitar las impurezas restantes y remover algún otro material en suspensión y ácidos orgánicos. El producto resultante se envía a los clarificadores para que se asiente y posteriormente a los evaporadores. Finalmente, se recupera el azúcar contenido en los lodos asentados con filtros rotativos.

2.4. Evaporación

Una vez clarificado, el jugo se concentra en los evaporadores para obtener un jarabe de dulzor aproximado a los 60 grados Brix.

2.5. Cristalización

Para la obtención del azúcar es necesario concentrar el jugo, por lo que se introduce al vacío en tachos donde se sobresatura y se produce el llamado semillamiento en el cual se forman los cristales de azúcar (Gossman et al., 2017).

2.6. Centrifugado y Secado

En las centrifugadoras se separan los cristales de azúcar de la miel; para optimizar el resultado se adicionan cristalizadores que permiten extraer una mayor cantidad de azúcar. Al residuo de este procedimiento se le da el nombre de melaza y se le considera un subproducto del cual se pueden obtener varios productos más. Después de secar los cristales, el color del azúcar toma tonalidades que van del amarillo al marrón (Figura 3). De este proceso se obtiene azúcar de cuatro calidades: mascabado, estándar, refinado y blanco, que se diferencian por el número de veces que fueron procesadas o refinadas. El azúcar menos refinado es el mascabado (SEITA, 2019).

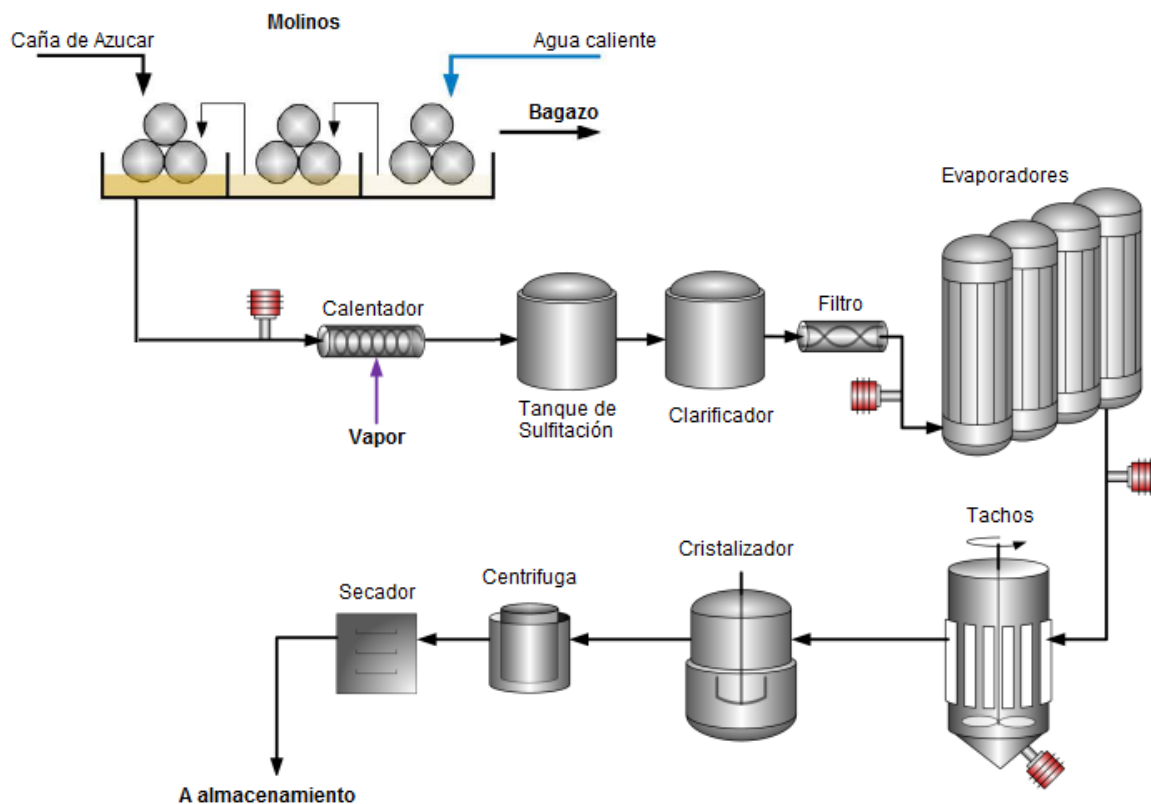


Figura 6. Esquema del proceso de industrialización de la caña de azúcar para la obtención de azúcar.

Fuente: SEITA, 2019.

Bibliografía

- Aguilar Rivera, N. (2009). Diversificación productiva de la industria azucarera: ¿Reto tecnológico, económico o social? *Mundo siglo XXI*, 18, 53-66. <http://biblat.unam.mx/hevila/MundosigloXXI/2009/no18/5.pdf>
- Aguilar Rivera, N. (2011). Ficha Técnica del cultivo de Caña de Azúcar. En *Nutrición de Bovinos*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). http://nutriciondebovinos.com.ar/MD_upload/nutriciondebovinos_com_ar/Archivos/File/CAÑA_DE_AZÚCAR,_FICHA_TÉCNICA.pdf
- Asociación Nacional de Empresas Comercializadoras de Productores del Campo (ANEC). (2018). Ficha técnica de la caña de azúcar. En *Sistema Integral ANEC*. <http://siafemor.inifap.gob.mx/anec/ficha-tecnica-cana.php>
- Barbieri, V. (s. f.). *Condicionamento climático da produtividade potencial da cana-de-açúcar (Saccharum spp); um modelo matemático-fisiológico de estimativa* [Tesis de Doctorado]. Universidade de São Paulo.
- Bioenciclopedia. (2022, 20 octubre). *Caña de Azúcar*. bioenciclopedia.com. <https://www.bioenciclopedia.com/cana-de-azucar-491.html>
- Cervantes Preciado, J. F., García Preciado, J. C., Bermúdez Guzmán, M. de J. & Vizcaíno Guardado, A. (2017). Tecnología de producción de caña de azúcar para el estado de Colima. En *DOCPLAYER*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). <https://docplayer.es/77761733-Tecnologia-de-produccion-de-cana-de-azucar-para-el-estado-de-colima.html>
- Comité Estatal del Sistema Producto Caña de Azúcar del Estado de San Luis Potosí. (2013). Diagnóstico y plan rector del sistema producto caña de azúcar Estado de San Luis Potosí. En *Sistema de Información para la Integración del Balance Azucarero (SIIBA)*. Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Recursos Hidráulicos (SEDARH). <https://siiba.conadesuca.gob.mx/siiba/consulta/verdoc.aspx?num=26>
- Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA). (2015). Ficha técnica del cultivo de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.). En *Gobierno de México*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/141823/Ficha_T_cnica_Ca_Ca_a_de_Az_car.pdf
- Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA). (2016). Variedades con mejores rendimientos de las zonas cañeras en México. En *Gobierno de México*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/114367/Nota_Informativa_Febrero_2016_Variedades_con_Mejores_Rendimientos_de_las_Zonas_Ca_eras_en_M_xico.pdf

- Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA). (2019). Diagnóstico de la agroindustria de la caña de azúcar – Región Noreste. En *Diagnósticos Regionales de la Agroindustria de la Caña de Azúcar en México*. <https://www.gob.mx/conadesuca/documentos/diagnosticos-regionales-de-la-agroindustria-de-la-cana-de-azucar-en-mexico>
- Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (CONADESUCA) & Universidad Autónoma Chapingo (UACH). (2017). Identificación de paquetes tecnológicos para el cultivo de caña de azúcar en las regiones cañeras de México. En *Gobierno de México*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/351202/Paquete_Tecnologico_vFinal_1_.pdf
- Cruz Guevara, N. Y. & Carrillo Inungaray, M. L. (2014). Control del salivazo o mosca pinta (aeneolamia postica) en la caña de azúcar. *Tlatemoani: Revista Académica de Investigación*, 19, 130-145. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/7303920.pdf>
- ECURED. (2010, octubre). *Caña de azúcar*. https://www.ecured.cu/+Ca%C3%B1a_de_az%C3%BAcar
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA). (2010). Producción Sostenible de Caña de Azúcar en México. Boletín Informativo. En *FIRA* (N.o 11). <https://www.fira.gob.mx/InfEspDtoXML/abrirArchivo.jsp?abreArc=3681>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2017). *The future of food and agriculture: Trends and challenges*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/3/i6583e/i6583e.pdf>
- Gossman, D., NitzRhetzmann & Peláez, M. (2017). Semillamiento con Kebo Slurry para cristalización en Ingenios de azúcar de caña. En *Asociación de Técnicos Azucareros de México (ATAM)*. <https://www.atamexico.com.mx/wp-content/uploads/2017/11/30.-F%C3%81BRICA-I.pdf>
- Hernández Rosas, F. (2018). Barrenador (*Diatraea saccharalis*) y mosca pinta (*Aeneolamia* spp., *Prosapia* spp.) en caña de azúcar y sus enemigos naturales. *Agroproductividad*, 4(3). <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/578>
- Judd, W. S., Donoghue, M. J., Campbell, C. S., Kellogg, E. A. & Stevens, P. F. (2015). *Plant Systematics: A Phylogenetic Approach*. Sinauer.
- Laboratorio Clínico Weyslab (Weyslab). (2018, 20 septiembre). *Conoce algunas consecuencias de la quema de caña de azúcar*. WEYSLAB | Laboratorio Clínico y Consultorio Médico. <http://www.weyslab.com/conoce-algunas-consecuencias-de-la-quema-de-cana-de-azucar/>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (2017). Caña de azúcar mexicana. En *Planeación Agrícola Nacional*

2017-2030. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/256427/B_sico-Ca_a_de_az_car.pdf

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER). (2019, 20 agosto). *Etapas del cultivo de caña*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/etapas-del-cultivo-de-cana>

SEITA. (2019, 4 abril). *Industria Azucarera*. Aplicaciones por industria. <https://www.seita.com.co/aplicaciones/industria-azucarera/>

Sentíes Herrera, H. (2016). El Mejoramiento Genético de la Caña de Azúcar (*Saccharum* spp.) en México: Una Historia de Éxito con Nuevos Desafíos. *Agroproductividad*, 9(7), AP AGROPRODUCTIVIDAD. <https://revista-agroproductividad.org/index.php/agroproductividad/article/view/778>

Torres Paz, J. & Acosta Granados, J. (2002). Fisiología de la caña de azúcar. I. La maduración y el sazonado. En *Universidad de Matanzas. Monografías*. <http://monografias.umcc.cu/monos/2002/Jesus%20Torres.pdf>

2. ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIONES DE CARBONO NEGRO EN LA REGIÓN CAÑERA NORESTE DE MÉXICO

Resumen

La actividad cañera en México y particularmente en la zona región noreste del país es de suma importancia económica y social; sin embargo, también tiene un impacto ambiental y para la salud humana. En su conjunto, los procesos del cultivo que implican la combustión de biomasa o combustibles fósiles producen una diversidad de contaminantes del aire, entre los que destaca el carbono negro (BC). Sin embargo, su monitoreo se ha limitado a las grandes ciudades o países con redes de monitoreo terrestre bien estructuradas. En el caso de México, este es el primer monitoreo in situ realizado en una zona rural. Con los datos obtenidos fue posible verificar las imágenes MERRA-2 que monitorean BC, y crear un modelo matemático con el cual se comparó la información de las imágenes sin y con verificación de datos de campo, constatando sus diferencias y posibilitando el análisis espaciotemporal del fenómeno. Para las predicciones se crearon 4 modelos (a intervalos de 6 horas) para diferentes horas del día del mes de enero de 2021. Con ellos se mostraron las variaciones de contaminación por BC en los diferentes ingenios de la zona, así como las mostradas a diferentes horas del día. Las concentraciones llegaron a superar $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con lo cual además de contribuir al calentamiento global hay efectos en la salud humana en el corto plazo e incluso mortandad en el largo plazo.

Palabras clave: *Imágenes MERRA-2; datos de etalómetro; monitoreo híbrido; modelo.*

Abstract

The sugarcane activity in Mexico, and particularly in the northeastern region of the country, is of great economic and social importance; however, it also has environmental and human health impacts. The cultivation processes, which involve the combustion of biomass or fossil fuels, generate a variety of air pollutants, among which black carbon (BC) stands out. However, its monitoring has been limited to large cities or countries with well-structured terrestrial monitoring networks. In the case of Mexico, this is the first in situ monitoring conducted in a rural area. With the data obtained, it was possible to verify the MERRA-2 imagery for monitoring BC and to build a mathematical model to compare the information from the imagery without and with the verification of field data, confirming their differences and allowing a spatiotemporal analysis of the phenomenon. For the predictions, 4 equations (in 6-hour intervals) were made for different hours of the day in the month of the month of January 2021, showing the variations of BC load in the different sugar mills of the region, as well as the variations at different hours of the day. Concentrations exceeded $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, thus not only contributing to global warming, but also resulting in short-term human health impacts and even long-term mortality.

Key words: *MERRA-2 images; aethalometer data; hybrid monitoring; model.*

Introducción

La región cañera noreste se ubica entre la Sierra Madre Oriental y la llanura del Golfo de México; en ella se encuentran 8 de los 49 ingenios azucareros de México: Aarón Sáenz Garza y El Mante, en Tamaulipas; San Miguel del Naranjo, Alianza Popular, Plan de San Luis y Plan de Ayala, en San Luis Potosí, y Pánuco y El Higo, en Veracruz (CONADESUCA, 2021). Con casi 25 mil productores y una superficie establecida de 130 mil hectáreas, esta actividad generó una derrama económica de 4.6 billones de pesos durante la última cosecha (SIAP, 2021).

Sin embargo, pese a su importancia socioeconómica, hay actividades del proceso productivo e industrial con fuertes efectos negativos para el ambiente y la salud humana (Cheesman 2004). La cosecha por doble quema es una práctica común en muchos países productores de caña (Dengia y Lantinga 2018).

Mediante este proceso se emiten diversos contaminantes como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos no metánicos (NMHC), metano (CH₄), anhídrido sulfoso, anhídrido carbónico y otros hidrocarburos, además de partículas PM 10 y PM 2.5 (Hernández-Garcés et al. 2019).

Un importante componente de las PM 2.5 producidas es el carbono negro (BC), un contaminante climático de vida corta (CCVC), capaz de retener la luz, transformarla en calor y provocar calentamiento atmosférico, así como alteraciones en los patrones climáticos (Cho 2016).

Esta partícula se produce por la combustión incompleta e ineficiente de combustibles fósiles y biomasa (Healy et al. 2017), y es el segundo agente más potente de cambio climático, después del dióxido de carbono (CO₂) (Salomon *et al.*, 2018). Además, su exposición directa se ha asociado a paros e insuficiencia cardíacos, derrames sanguíneos, cáncer pulmonar, bronquitis crónica, asma, enfisema y bajo peso al nacer; así como a deshidratación severa, disfunción renal aguda y genotoxicidad, por mencionar algunos (Chaudhuri *et al.*, 2017; Yong *et al.*, 2019).

Por otra parte, los derivados de combustibles fósiles que utilizan algunos ingenios para sus procesos, y el tráfico de vehículos pesados que se genera durante la temporada de zafra, también emiten una importante cantidad de BC en las zonas donde se produce e industrializa la caña (Birru *et al.*, 2016).

Todo lo anterior contribuye al deterioro de la calidad del aire a nivel local y global; sin embargo, el estudio del BC es relativamente reciente y está sujeto a los datos generados por estaciones terrestres de monitoreo del aire. Los satélites para la observación de la Tierra han permitido el monitoreo de contaminantes como el BC en superficies extensas casi en tiempo real y a un bajo costo. Sin embargo, aún es necesaria la verificación de las imágenes con datos de campo o la creación de algoritmos. Por ello, las investigaciones que se han desarrollado en torno al tema se han realizado en ciudades o

en países con una buena red de monitoreo terrestre de la calidad del aire (Murthy *et al.*, 2020).

México sólo se cuenta con redes de monitoreo confiables en algunas ciudades como Ciudad de México y Guadalajara, por lo que la medición de contaminantes del aire en zonas rurales y agrocidades es prácticamente inexistente, omitiendo que en estas zonas se realizan actividades altamente contaminantes con las consecuentes repercusiones para la población y el ambiente.

Un pronóstico preciso de la concentración de BC será crucial en el futuro cercano para la creación de alertas de episodios de concentraciones dañinas para la población y estimar la tendencia histórica del país, y su contribución al cumplimiento de los acuerdos internacionales de reducción de emisiones.

Por todo lo anterior, el objetivo de esta investigación fue el de crear un modelo matemático replicable que aplicado a imágenes de satélite mejore la precisión de las estimaciones de BC, incluso en zonas carentes de redes de monitoreo terrestre, con la instalación equipos móviles de monitoreo terrestre.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio está conformada por las zonas que integran las áreas de influencia de los 8 ingenios que se ubican en la región cañera noreste de México; dicha área se concentra en la zona de intersección de los estados de San Luis Potosí, Tamaulipas y Veracruz (Figura 1).

Metodología

Para esta investigación se propuso la creación de un modelo creado a partir de imágenes de satélite y datos obtenidos a nivel de suelo. El modelo se aplicó para predecir el nivel de BC en la región cañera noreste de México.

Monitoreo in situ. El monitoreo in situ se sincronizó con la zafra del Ingenio Plan de Ayala, ubicado en Cd. Valles, S. L. P., que comenzó la zafra 2020-2021 en noviembre de 2020 y la concluyó en mayo de 2021. El equipo se instaló el 12 de noviembre de 2020 al 13 de mayo de 2021 en el Instituto Tecnológico de Ciudad Valles, S. L. P., situado a un kilómetro del Ingenio (Figura 1).

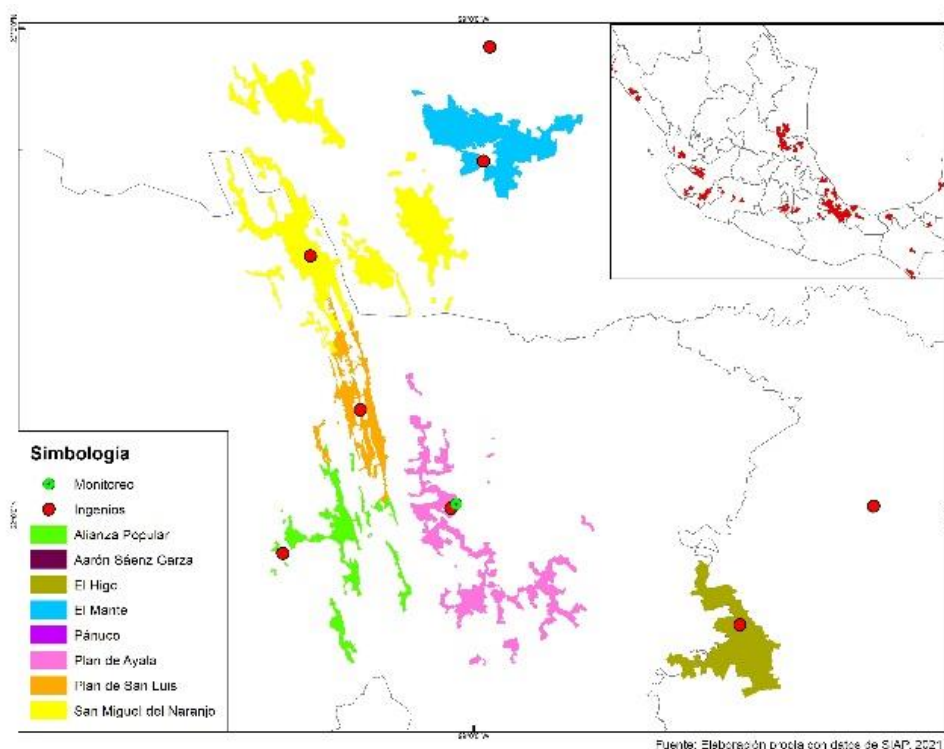


Figura 1. Localización del área de estudio.

Se instaló un etalómetro modelo AE 33 (fabricado en E. U. A.), un equipo automático que realiza análisis óptico mediante tecnología de atenuación de transmisividad de luz en el espectro infrarrojo en longitudes de onda 370, 470, 520, 590, 660, 880 y 950 nm.

El instrumento aspira el aire mediante un tubo vertical aproximadamente 4 metros del nivel del suelo, para evitar interferencia cercana o influencia directa con el polvo del suelo o del techo. En la entrada de la toma de muestra se coloca un ciclón de 2.5 μm para evitar partículas gruesas. Las partículas en el flujo de aire entrante se depositan en el filtro de politetrafluoroetileno (PTFE), que operan continuamente a un flujo de 5 litros por minuto (LMP) y las mediciones se registran para una solución de tiempo de 1 minuto de duración a condiciones estándar (1013.25 hPa y 25°C), durante todo el día (Suárez *et al.*, 2007).

Insumos satelitales.

Preprocesamiento. Para llevar a cabo la recopilación de las concentraciones horarias de carbono negro en la superficie, se llevaron a cabo una serie de pasos de preprocesamiento para obtener la variable a utilizar dentro de la colección de datos bidimensionales promediados por hora de MERRA-2. Las imágenes horarias de la variable se obtuvieron del portal GIOVANNI (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>) a

través de GES DISC (https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/M2T1NXAER_5.12.4/summary). El conjunto de datos utilizado (M2T1NXAER) consiste en un modelo de diagnóstico de aerosoles asimilados en los que se encuentran los componentes del carbono negro a 550 nm, entre otros. La variable utilizada del modelo fue la denominada BCSMASS (black carbon surface mass concentration), a la cual, le fue aplicado un remuestreo utilizando la interpolación del vecino más cercano propuesta en CDO User Guide Climate Data Operator (CDO) Version 1.9.6, cuyo enfoque de muestreo es factible y adoptado en estudios de validación (Hongliang et al., 2021) para así obtener una malla de 0.25° (aproximadamente 27 km) en formato netCDF.

Análisis espectral. Para obtener el valor de concentración de carbono negro se utilizó una malla de 27 km x 27 km (729 km²), donde se ubicó el píxel con las coordenadas -99.0625 de longitud oeste y 22.00 de latitud norte que corresponde geográficamente con la ubicación del monitoreo in situ, apoyado con GPS. Para la representación georreferenciada de las imágenes de concentraciones de carbono negro (netCDF) se utilizó el software visor de datos llamado Panoply (<https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>) versión 4.11.2 de la NASA/GISS. Los valores de las concentraciones horarias se desplegaron de los conjuntos de datos a través de varios arreglos por píxel y hora para la posterior exportación a una base de datos, lo anterior para conocer las variaciones temporales en las concentraciones de carbono negro de los modelos provenientes de MERRA-2 para aplicar los modelos geoestadísticos con el monitoreo in situ.

Modelo de predicción de concentraciones de carbono negro. El modelo se creó con los datos de BC obtenidos en tierra y los resultantes del análisis espectral realizado a las imágenes MERRA-2. Cabe mencionar que dicho análisis se realizó con imágenes completamente coincidentes temporal y espacialmente con el monitoreo in situ. Con el conjunto de datos, se diseñó una base que contiene BC total, BC por quema de biomasa y BC por combustión de derivados de petróleo (del etalómetro); además del BC del análisis espectral (imágenes MERRA-2).

Para crear el modelo se corrieron pruebas de correlación entre variables y se seleccionaron las de mayor valor y que cumplieron con los supuestos de normalidad, para lograr mejor ajuste en el modelo.

Finalmente, se eligió la información del mes de enero que fue el periodo donde se obtuvieron mejores resultados en la correlación, además de ser uno de los meses donde de la zafra se encuentra a máximo nivel; es decir, donde se emite más contaminación, para el posterior análisis espaciotemporal de las imágenes sin verificar contra las imágenes verificadas con la información de campo.

Resultados

Se realizaron pruebas de correlación entre las observaciones provenientes del monitoreo en tierra y las de las imágenes MERRA-2. Para ello, se probó con los meses que duró la

zafra. Sin embargo, el análisis espectral de algunos de estos meses mostró valores atípicos y patrones difusos de variación temporal de las concentraciones de BC, propiciando que los coeficientes de correlación fueran muy bajos e impidiendo con ello un buen ajuste de las ecuaciones.

Por lo anterior, después de correr las pruebas, se decidió utilizar las ecuaciones resultantes del mes de enero, ya que son las que cumplieron con los supuestos de normalidad y coeficientes de correlación positivos superiores a 0.5; es decir, de correlación moderada a fuerte. Tomando en cuenta el tamaño de muestra considerado para cada ecuación, los coeficientes obtenidos se pueden considerar significativos (Martínez *et al.*, 2009). Además, se consideraron intervalos de 6 horas en las estimaciones, ya que fueron suficientes para verificar las variaciones diurnas y no hubo diferencias espaciotemporales perceptibles a intervalos menores (Tabla 1).

Tabla 1. Ecuaciones obtenidas con las correlaciones del mes de enero de 2021 entre datos de tierra y datos de imágenes MERRA-2 en intervalos de tiempo de 6 horas.

Hora	Ecuación	R ² ajustado
03:00	$EBC = 0.8396x + 0.1656$	0.521
09:00	$EBC = 0.8612x - 0.0447$	0.729
15:00	$EBC = 0.7988x + 0.1887$	0.561
21:00	$EBC = 1.7754x + 0.1454$	0.604

Con las ecuaciones obtenidas se realizó la verificación de la información de las imágenes de satélite y se crearon modelos de predicción para poder comparar las concentraciones resultantes entre las imágenes sin verificación (a) y las verificadas (b) (Imagen 2).

Lo primero que se pudo observar en ambos conjuntos de imágenes fue la variación de las concentraciones de BC a lo largo del día. No obstante, en las imágenes sin verificar el patrón de variación es difuso; en tanto que en las imágenes verificadas se puede observar que las emisiones se incrementan conforme avanzan las horas del día. Este comportamiento es mucho más cercano a los datos obtenidos por el monitoreo en tierra y se puede explicar dado que algunos ingenios, como el Plan de Ayala, tienen su procesamiento más intensivo durante las horas nocturnas, lo que hace suponer que utilizan combustibles fósiles y tratan de que ello sea menos evidente.

Al respecto, se pudo constatar que en las imágenes sin verificación las concentraciones de BC no superan los 0.9 µg/m³ en zonas en ninguna hora del día del mes analizado; sin embargo, las concentraciones más altas se presentan a las 9:00 horas y en donde la mayor parte de la superficie muestra de 0.6 a 0.7 µg/m³.

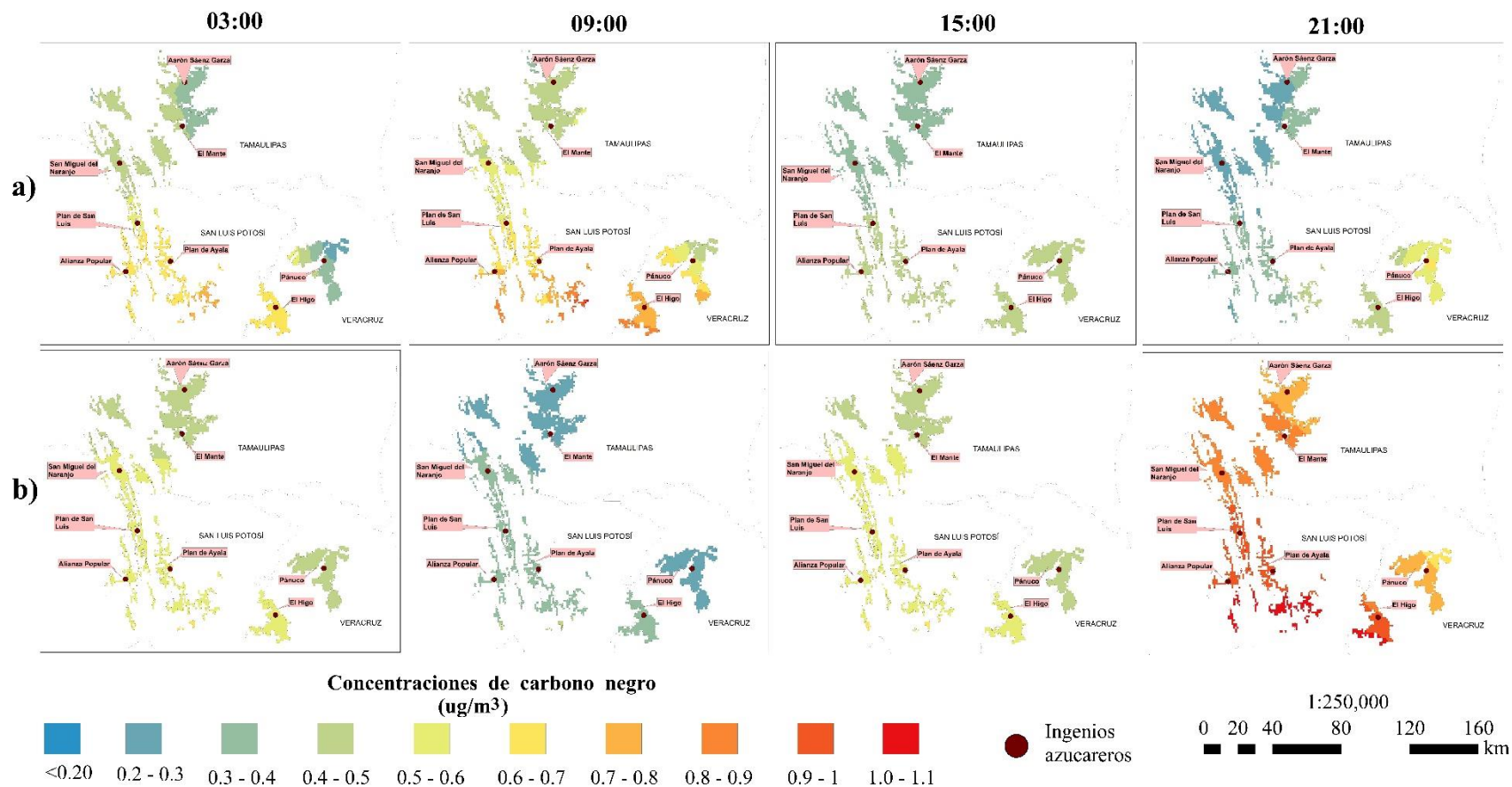


Figura 2. Estimación de carbono negro en la región cañera noreste de México, durante el mes de enero de 2021, en lapsos de 6 horas. a) Sin verificación con datos de tierra; b) Con verificación de datos de tierra.

Por otro lado, las imágenes verificadas las concentraciones llegaron hasta $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$; esto sucedió a las 21:00 horas, horario en el que prácticamente toda la región mostró concentraciones superiores a los $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y llegando hasta los $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los resultados indican que las concentraciones descienden en torno a las manecillas del reloj, comenzando con las superiores en los ingenios del estado de San Luis Potosí, seguidas por las de Tamaulipas y finalmente las de Veracruz. Este es un patrón imperfecto seguido en todas las horas del día.

Discusión

Según De la Cruz (2017), la emisión de BC provoca forzamiento radiativo positivo cercano a los $0.5 \text{ W}/\text{m}^2$, lo que se traduce como calentamiento global. Además, la exposición directa de los seres humanos al BC tiene diferentes efectos de acuerdo con la concentración y tiempo en que la gente lo respire. Las concentraciones registradas en la zona de estudio son suficientes para que se presenten arritmias cardíacas y sintomatología de asma y bronquitis en el corto plazo; así como disfunción endotelial, que promueve la arteriosclerosis, e incluso mortalidad por enfermedad coronaria en el largo plazo.

Con la investigación se constata que independientemente de la metodología que se utilice la actividad cañera en el país genera una importante cantidad de BC en todas las zonas productoras del país; por los sistemas productivos e industriales prevalecientes, caracterizados por sistemas de producción e industrialización envejecidos y obsoletos.

No obstante, la región noreste, que es la segunda más contaminante del país, también cuenta con condiciones particulares la vuelven especialmente vulnerable poniendo en riesgo el medio de sustento de una gran cantidad de personas que de forma directa o indirecta dependen de ella.

Es por ello que es de suma importancia la implementación de verdaderos sistemas de vigilancia que además de crear alertas para la población, den elementos suficientes y confiables a tomadores de decisiones para que implementen medidas que no solamente se encaminen al cumplimiento de los acuerdos internacionales de México de reducción de emisiones, sino que coadyuven en la problemática ambiental regional, nacional y mundial.

Conclusiones

Indudablemente los satélites de observación de la tierra desde sus comienzos han sido de gran utilidad para la humanidad en el estudio de fenómenos tan diversos como los cambios de uso de suelo y la contaminación y, la creación de alertas meteorológicas o de ataques de plagas.

No obstante, en temas tan recientes como el monitoreo de BC, la tecnología está en continuo desarrollo, por lo que las imágenes y modelos creados para monitorearlo, aún es necesario verificar la información contenida en las imágenes utilizadas.

Aunque en la actualidad existen algoritmos capaces de realizar dicha verificación, debido a que éstos requieren un alto nivel de conocimientos específicos de programación y otras áreas, lo más común es que dicha verificación se realice con información generada a nivel de tierra, la cual, como se pudo observar en este estudio, es necesaria para mejorar la precisión de las estimaciones.

Independientemente del método de monitoreo que se utilice, es innegable el impacto ambiental y en la salud humana que la actividad cañera ha generado y sigue generando en sus zonas de influencia. No obstante, una decisión radical como el cambio de giro productivo no es una opción para una importante cantidad de personas que dependen de esta actividad de forma ancestral.

Sin considerar el hecho de que la agroindustria azucarera nacional se encuentra en una crisis multifactorial, existen zonas y particularmente ingenios como los de San Luis Potosí que ven seriamente comprometida su sostenibilidad en el tiempo, de continuar produciendo bajo los mismos sistemas y en la misma dinámica que lo han hecho hasta ahora.

Literatura citada

- Birru, E., C. Erlich, G. Bekele-Beyene and A. Martin. 2016. Upgrading of a traditional sugar cane mill to a modern mill and assessing the potential of energy saving during steady state and transient conditions—part II: models for a modified cogeneration unit. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 6: 233–245 DOI:10.1007/s13399-015-0180-8.
- Columbia Climate School. 2016. The Damaging Effects of Black Carbon. <https://news.climate.columbia.edu/2016/03/22/the-damaging-effects-of-black-carbon/> (Consulta: mayo 20, 2021).
- CONADESUCA (Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar). 2021. Sistema Sinfocaña. México. <https://www.siiba.conadesuca.gob.mx/infocana/> (Consulta mayo 11, 2021).
- Chaudhuri, I., C. Fruijtier, Y. Ngiewih, and L. Levy. 2017. Evaluating the evidence on genotoxicity and reproductive toxicity of carbon black: a critical review. *Critical Reviews in Toxicology* 48:1-27 DOI:10.1080/10408444.2017.1391746.
- Cheesman, O. D. 2004. Environmental Impacts of Sugar Production. *The Cultivation and Processing of Sugarcane and Sugar Beet*. Cromwell Press. Trowbridge, UK. 255 p.
- De la Cruz-Dengia, K. 2017. Variación estacional de carbono negro atmosférico en Ciudad Universitaria durante 2015-2016. Tesis de Licenciatura. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. Ciudad de México. 144 p.
- Dengia, A. and E. Lantinga. 2018. Effect of Pre-Harvest Cane Burning on Human Health, Soil Quality and Rate of Cane Weight Loss in Ethiopian Sugarcane Plantations. *Advances in crop science and technology* 6:396 DOI:10.4172/2329-8863.1000396.

- Healy, R. M., U. Sofowote, Y. Su, J. Debosz, M. Noble, C. H. Jeong, J. M. Wang, N. Hilker, G. J. Evans, G. Doerksen, K. Jones and A. Munoz. 2017. Ambient measurements and source apportionment of fossil fuel and biomass burning black carbon in Ontario. *Atmospheric environment* 161:34-47 DOI:10.1016/j.atmosenv.2017.04.034.
- Hernández-Garcés, A., M. Reynosa-Valladares, F. Hernández- Bilbao y J. Canciano-Fernández. 2019. Emisión de contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros santiagueros. *Tecnología Química* 39:390-402.
- Hongliang, H., Zeng, J., Zhang, X., Fu, P., Zheng, D., Wigneron, J. P., ... and Niyogi, D. (2021). Evaluation of six satellite-and model-based surface soil temperature datasets using global ground-based observations *Remote Sensing of Environment* 264:112605.
- Martínez-Ortega, R. M., Tuya-Pendás, L. C., Martínez-Ortega, M., Pérez-Abreu, A. y Cánovas, A. M. 2009. El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas* 8.
- Murthy, B. S., R. Latha, R. Srinivas and G. Beig. 2020. Particulate Matter and Black Carbon in the Brahmaputra Valley of Northeast India: Observations and Model Simulation. *Pure and Applied Geophysics* 177:5881-5893 DOI:10.1007/s00024-020-02590-1.
- Salomon, S., D. Qin, M. Manning, et al. 2018. Informe aceptado por el Grupo de Trabajo I del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático pero no aprobado en detalles. *Resumen Técnico*. 94 p.
- SIAP (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2021. Avance de siembras y cosechas. México. https://nube.siap.gob.mx/avance_agricola/ (Consulta: mayo 12, 2021).
- Yong, M., L. Anderle, L. Levy and R. J. McCunney. 2019. Carbon Black and Lung Cancer Mortality-A Meta-regression Analysis Based on Three Occupational Cohort Studies, *Journal of Occupational and Environmental Medicine* 61:949-954 DOI:10.1097/JOM.000000000000171