



**Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“MODELACIÓN DE LA TRAYECTORIA Y DISPERSIÓN
DE EMISIONES CONTAMINANTES DERIVADAS DE LA
TEMPORADA DE ZAFRA EN IZÚCAR DE MATAMOROS,
PUEBLA 2018-2022, UTILIZANDO HYSPLIT”**

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el Título de:

Licenciatura en Ingeniería Ambiental

Presenta:

LIZBETH GÓMEZ VICTORIA

Director de Tesis:

M.I. Ángel Silveti Loeza

Puebla, Pue., Mayo 2024.

1. Planteamiento del problema.....	1
2. Justificación.....	2
3. Objetivos.....	4
3.1. Objetivo general.....	4
4. Hipótesis.....	4
5. Marco teórico.....	5
6.1. La atmósfera y su composición.....	5
6.1.1. Troposfera.....	5
6.1.1.1 Capa límite planetaria.....	7
6.1.2. Estratosfera.....	10
6.1.3. Mesosfera.....	11
6.1.4. Termosfera.....	11
6.1.5. Exosfera.....	12
6.2. Contaminación atmosférica.....	12
6.2.1. Principales contaminantes atmosféricos.....	13
6.2.2. Dispersión de los contaminantes en la atmósfera.....	16
6.2.3. La zafra azucarera y su contribución en la contaminación atmosférica.....	16
6.2.4. Antecedentes en México sobre la zafra y sus efectos en la salud.....	18
6.2.5. Legislación y normatividad mexicana.....	19
6.2.5.1. Marco normativo vigente referente a la calidad del aire ambiente.....	19
Ley General de Salud.....	19
Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente.....	20
6.2.5.2. NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007.....	24
6.3. FIRMS NASA.....	32
6.4.1. Enfoque Lagrangiano y Euleriano.....	36
6.4.3. Modelo HYSPLIT.....	38
7. Metodología.....	42
7.1. Descripción del área de estudio.....	42
7.2. Recopilación de datos.....	43
7.2. Desarrollo de simulaciones de dispersión y trayectoria en HYSPLIT.....	45
7.2.1. Simulaciones de trayectoria.....	45
7.2.2. Simulaciones de dispersión.....	46
8. Resultados.....	48
8.1. Periodo noviembre 2018 a junio 2019.....	53
8.2. Periodo noviembre 2019 a junio 2020.....	59
8.3. Periodo noviembre 2020 a junio 2021.....	65
8.4. Periodo noviembre 2021 a junio 2022.....	72
9. Conclusiones.....	78
10. Referencias.....	79

1. Planteamiento del problema

De acuerdo con la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) la contaminación del aire es uno de los principales problemas ambientales y de salud pública de México y del mundo. Datos de la Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y el Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC), estiman que en el año 2014 se emitieron a nivel nacional, sin considerar a las fuentes móviles, alrededor de 23.3 millones de toneladas de contaminantes. En donde, las fuentes naturales emitieron 51.5% del total de los contaminantes y las antropogénicas el 48.5% restante (Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire y RETC, 2018 citado en SEMARNAT, 2023).

La quema de biomasa representa una fuente significativa de emisiones contaminantes, y desafortunadamente es una práctica común en la actualidad, esta puede ser ocasionada de manera natural o antropogénica. Sin embargo, la mayor cantidad de veces la quema de biomasa es inducida por el hombre, debido a la expansión agrícola, deforestación, cambio de uso de suelo, y el control de plagas o maleza (Cole, 2001).

El municipio de Izúcar de Matamoros en Puebla, es reconocido principalmente por su actividad agrícola cañera, abarcando una superficie de 15 mil 500 hectáreas, con una producción estimada de un millón 700 mil 750 toneladas de caña procesada (Representación de Agricultura en Puebla, 2018). Si bien es cierto que esto genera una considerable derrama económica para el municipio, según la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER, 2019), también conlleva un impacto ambiental considerable. Durante la temporada de zafra, las plantaciones suelen ser incendiadas antes de la cosecha para facilitar la recolección manual, lo que contribuye a la contaminación atmosférica.

A pesar de que esta actividad agrícola puede ser visible en ocasiones debido a la gran magnitud de los incendios, es una de las problemáticas más difíciles de evaluar por la gran cantidad y variedad de las fuentes emisoras. Además, el transporte, transformación y deposición de los contaminantes en la atmósfera, vuelve aún más difícil realizar un

seguimiento a estas emisiones y por la tanto, es necesario utilizar modelos y softwares que puedan proporcionar predicciones numéricas de manera precisa y computacionalmente eficiente (Leelőssy *et al.*, 2014). Por este motivo, el presente trabajo tiene como objetivo emplear la base de datos proporcionada por FIRMS NASA, conocida en español como el Sistema de Información sobre Incendios para la Gestión de Recursos de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio. Esta base de datos ofrece información histórica sobre incendios y anomalías térmicas. Luego, se procederá a procesar estos datos utilizando HYSPLIT, que en español se refiere al modelo Híbrido Lagrangiano de Trayectoria Integrada de Partícula Única. Este modelo permitirá simular la dispersión y la trayectoria de las emisiones a través de la atmósfera, abarcando desde escalas locales hasta globales.

2. Justificación

La quema de los cultivos de caña incluye la liberación de un amplio rango de compuestos como el dióxido de carbono (CO₂), monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) y hasta 37 compuestos orgánicos volátiles (COV) (Mugica-Álvarez *et al.*, 2018). La alta exposición a estas emisiones genera un factor de riesgo para desarrollar enfermedades respiratorias como asma, bronquitis, disnea, neumonía y síntomas de enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC), además de mortalidad cardiovascular (Karanasiou *et al.*, 2021)

Un estudio realizado por la Universidad Tecnológica de Izúcar de Matamoros (UTIM) demostró que existe una correlación entre la temporada de zafra y el incremento en la frecuencia de enfermedades respiratorias del municipio (Ruiz *et al.*, 2004). Y aunque está ubicada en una zona eminentemente rural, en época de zafra las personas pueden estar inhalando una dosis de HAPs similar a una ciudad de mediano desarrollo industrial (Navarro *et al.*, 2006).

La liberación accidental o intencional de agentes químicos o biológicos, puede tener implicaciones significativas para la salud, la seguridad nacional, la economía y el medio ambiente. Con el modelo de transporte y dispersión HYSPLIT esta información se puede

recopilar rápidamente para proporcionar a los servicios de emergencia pronósticos precisos y localizados, para guiar acciones que permitan reducir los impactos en la salud pública y la propiedad. Agencias gubernamentales, academias y empresas privadas de todo el mundo utilizan el modelo HYSPLIT para planificar y responder a situaciones de emergencia como la liberación de material radiactivo, humo de incendios forestales, polvo arrastrado por el viento, contaminantes de diversas fuentes de emisión, alérgenos y cenizas volcánicas (National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], s.f.; el nombre puede ser traducido como “Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica”).

De este modo, la investigación planteada contribuirá a generar simulaciones que permitirán visualizar la trayectoria y dispersión de las emisiones contaminantes generadas por la quema de biomasa, específicamente derivada de la temporada de zafra en el Municipio de Izúcar de Matamoros, y lo cual nos ayudará a identificar aquellas áreas vulnerables.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Modelar la trayectoria y dispersión de las emisiones contaminantes derivadas de la temporada de zafra en el municipio de Izúcar de Matamoros en Puebla, durante el periodo 2018-2022, mediante el uso de HYSPLIT.

3.2. Objetivos específicos

- Identificar los incendios en el municipio de Izúcar de Matamoros, Puebla mediante la base de datos FIRMS NASA en los períodos de zafra de 2018 a 2022.
- Realizar las simulaciones de trayectoria y dispersión de las emisiones contaminantes generadas por los incendios de mayor magnitud en el municipio de Izúcar de Matamoros, Puebla, 2018-2022, mediante el programa HYSPLIT.
- Analizar el comportamiento de las simulaciones de trayectoria y dispersión de las emisiones contaminantes obtenidas en HYSPLIT, para así determinar aquellas zonas que potencialmente pudieron ser afectadas.

4. Hipótesis

El comportamiento de la trayectoria y dispersión de las emisiones contaminantes derivadas de la temporada de zafra en el municipio de Izúcar de Matamoros tiene gran alcance, es decir, las emisiones llegaron a afectar otros municipios incluso otros estados.

5. Marco teórico

6.1. La atmósfera y su composición

La atmósfera, la envoltura gaseosa que rodea nuestro planeta, es crucial para la vida en la Tierra, y cualquier cambio en su composición o estructura puede tener un impacto significativo en los seres vivos. Tiene un espesor de 2000 km aproximadamente y a pesar de ser tan delgada, no es uniforme en todo su volumen, más bien se estructura en capas con distinta composición y propiedades físicas, las cuales se ven influidas por los procesos biológicos y geoquímicos, las radiaciones procedentes del sol o la atracción gravitatoria de la Tierra. En función de la variación de la presión y la temperatura, conforme se asciende desde el suelo, las capas se denominan troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera y exosfera (Figura 1) (Gallego *et al.*, 2012, p. 11-12).

6.1.1. Troposfera

Es la capa que se encuentra en contacto con la superficie de la Tierra y es donde todos los seres vivos desarrollan su ciclo vital. Tiene una altura media de 12 km, sin embargo esta es variable según la latitud, siendo máxima en el ecuador y mínima en los polos (Gallego *et al.*, 2012, p. 12-13).

La composición química de la troposfera generalmente es constante en todo su volumen. El gas mayoritario es el nitrógeno (N_2), el cual constituye un 78% del volumen total, siguiendo el oxígeno (O_2) con un 21% y el argón con 0,9%. El resto de gases que corresponden al 0,1%, son una gran variedad de compuestos que juegan un papel muy importante en las reacciones químicas en la troposfera. Entre estos está el dióxido de carbono (CO_2) y los óxidos de nitrógeno (NO_x), el monóxido de carbono (CO) y el ozono (O_3). El vapor de agua es el elemento más destacable dentro de la composición química de esta capa, sin embargo este suele ser muy variable en el tiempo y el espacio. Por ejemplo, se encuentra en proporciones que varían entre un 4% del total en las zonas tropicales hasta unas pocas décimas en los polos y las zonas desérticas. Gracias a la presencia del agua es

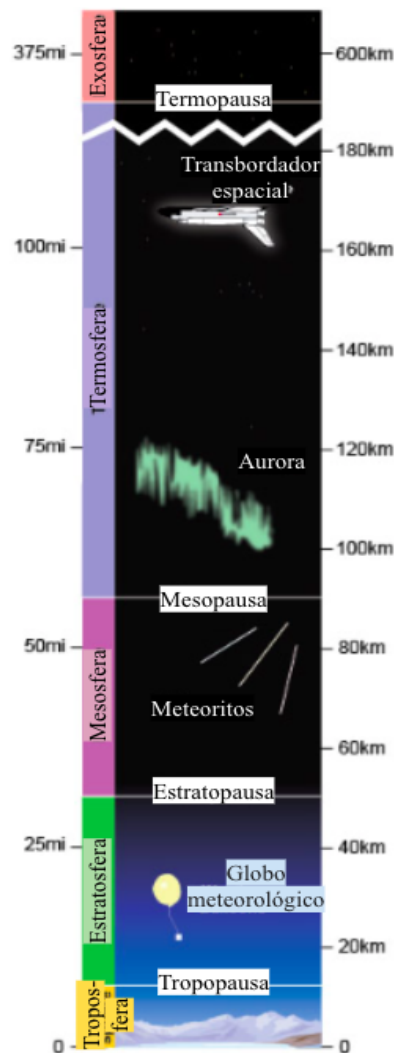
que gran parte de las reacciones químicas ocurren en la baja atmósfera. Además de estos compuestos gaseosos, también se pueden encontrar partículas sólidas y líquidas en suspensión, procedentes de los océanos, la erosión del suelo, las erupciones volcánicas o los incendios forestales (Gallego et al., 2012, p. 16-17).

La temperatura de la troposfera va disminuyendo conforme la altura, a razón de 6,6 °C por km, y varía también horizontalmente de unas zonas a otras del planeta. Debido a estos gradientes de temperatura, las masas de aire se mueven de manera horizontal y verticales, por lo que constantemente se ve sometida a perturbaciones y procesos turbulentos (fenómenos meteorológicos) que mantienen el aire en constante agitación. Los movimientos a los que las masas de aire se ven sometidas, hacen que los contaminantes que están en el aire terminen en lugares muy alejados de sus fuentes de emisión, y en esta acción también se provoca su dilución (Gallego et al., 2012, p. 13-14).

El límite entre la troposfera y la siguiente capa, la estratosfera, recibe el nombre de tropopausa. Aquí la tendencia de descenso de la temperatura con la altura se rompe, lo que supone un impedimento para la mezcla de gases a ambos lados de este límite, pues el aire ascendente de la troposfera no puede continuar su movimiento de subida. Es, por ejemplo, la altura a la que llegan las nubes más altas (Gallego et al., 2012, p. 17).

Figura 1

Estructura vertical de la atmósfera



Fuente: Adaptado de *The five basic layers of the atmosphere*, de National Oceanic and Atmospheric Administration, 2023, NOAA (<https://www.noaa.gov/jetstream/atmosphere/layers-of-atmosphere>). De dominio público.

6.1.1.1 Capa límite planetaria

Al hablar de la capa límite planetaria (CLP) nos estamos refiriendo a la capa más baja de la troposfera que siente los efectos de la superficie subyacente en aproximadamente 30 minutos o menos, cuyo espesor no es constante y varía durante el día (Tabla 1). En esta el viento se ve influenciado por la fricción y por flujos de calor en la superficie. Además esta capa es turbulenta y está bien mezclada. La turbulencia se genera

por el cizallamiento del viento (el viento es aproximadamente geostrófico en la parte superior de la CLP, pero cero en la superficie), y algo que puede generar o suprimir esta turbulencia son los gradientes de temperatura, (Haby, s.f.). En ocasiones, los fenómenos meteorológicos pueden hacer que el gradiente negativo de temperatura se acentúe, que disminuya o incluso se interrumpa a una altitud determinada. Cuando el gradiente vertical de temperatura se interrumpe, la temperatura del aire aumenta con la altura, lo que se conoce como inversión térmica. Las masas de aire por debajo de la inversión que son más frías y más densas, no pueden elevarse por encima del aire más cálido de la zona de inversión, produciendo el aislamiento de las capas de aire e impidiendo que su composición sea homogénea (Gallego et al., 2012, p. 13-14).

Tabla 1

Evolución de la capa límite planetaria a través del día

Hora	Características
6 am	<ul style="list-style-type: none"> ● La CLP puede llegar a tener una altura menor o igual a 100 metros. ● Sin presencia de turbulencia térmica, pero poca o ninguna turbulencia mecánica ya que los vientos cerca de la superficie están tranquilos. ● Los vientos están calmados cerca de la superficie, aumentan en fuerza una vez que se supera la inversión de radiación.
11 am	<ul style="list-style-type: none"> ● El calentamiento en la superficie genera una turbulencia térmica débil a moderada, forma pequeñas nubes cumulus y permite que la capa límite se desarrolle hacia arriba. ● Las térmicas mezclan los vientos más fuertes en las alturas hacia abajo, cerca del suelo; los vientos aumentan cerca de la superficie. ● Los vientos más fuertes en la superficie generan turbulencia mecánica a medida que interactúan con la superficie.

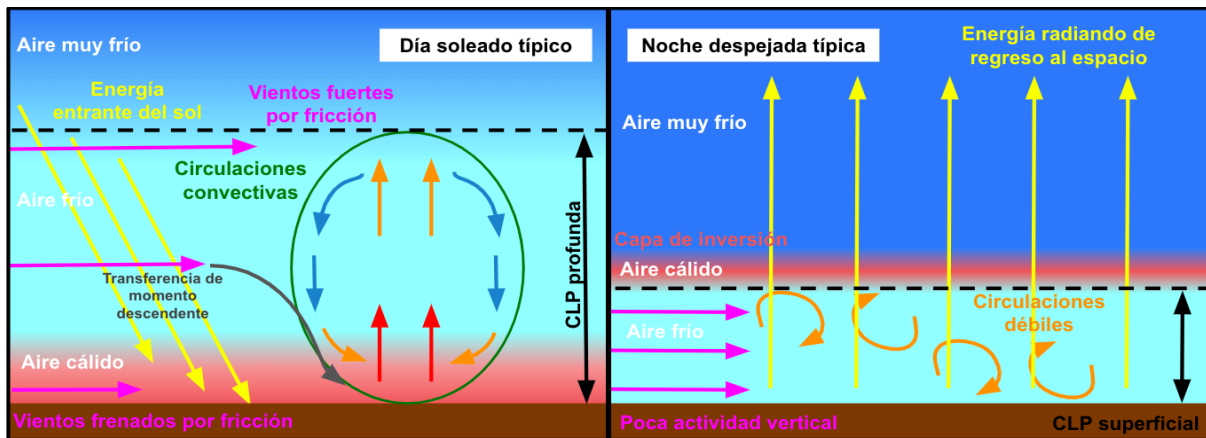
Hora	Características
3 pm	<ul style="list-style-type: none"> • Su altura puede llegar a estar entre 1 y 1.5 km. • El calentamiento en la superficie es máximo y por lo tanto, la turbulencia térmica es más fuerte en este momento del día. • Las térmicas mezclan hacia abajo velocidades de viento aún más fuertes hacia la superficie, generando una turbulencia mecánica más amplia. • Los vientos en la superficie son más fuertes en este momento, soplan con más intensidad. • El aire en la capa límite está bien mezclado, debido a la turbulencia térmica y mecánica.
6 pm	<ul style="list-style-type: none"> • Las temperaturas en la superficie comienzan a bajar. • La turbulencia térmica se detiene y por lo tanto, las nubes comienzan a disminuir. • La capa límite nocturna comienza a desarrollarse. • Los vientos comienzan a debilitarse en la superficie.

Fuente: Elaborado a partir de *The planetary boundary layer*, de J. Haby, s.f., National Weather Service (https://www.weather.gov/source/zhu/ZHU_Training_Page/clouds/planetary_boundary_layer/PBL.html). De dominio público.

En la Figura 2, se presenta en el lado izquierdo una representación idealizada de la atmósfera en un día despejado. La energía entrante del sol calienta el suelo, lo que a su vez calienta el aire cerca de la superficie. Este aire cálido luego asciende, enfriándose suavemente a medida que lo hace. En algún punto, ya no es más cálido que su entorno, por lo que desciende de nuevo, formando una circulación convectiva y estableciendo la mezcla vertical. Por otro lado, durante la noche, la tendencia energética en la superficie se revierte y en lugar de que el sol caliente la superficie, así como el aire adyacente, la energía vuelve hacia el espacio resultando en enfriamiento. Debido a que el aire cercano a la superficie no se enfría rápidamente, la inversión que estaba a gran altura ahora se encuentra justo por encima del suelo. Esto causa la desaparición de las circulaciones convectivas y una mezcla vertical mínima (Haby, s.f.).

Figura 2

Comparación entre la capa límite planetaria en el día y en la noche



Fuente: Adaptado de *The planetary boundary layer*, de J. Haby, s.f., National Weather Service (https://www.weather.gov/source/zhu/ZHU_Training_Page/clouds/planetary_boundary_layer/PBL.html). De dominio público.

6.1.2. Estratosfera

El sitio web de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA) (2023) describe a la estratosfera como la extensión que va desde los 6 a 20 km sobre la superficie de la Tierra y hasta alrededor de los 50 km. En esta región la temperatura va aumentando conforme la altura, debido a las reacciones fotoquímicas que ocurren en el proceso de formación de ozono, produciendo aumentos de temperatura, que van desde un promedio de $-51\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la tropopausa hasta un máximo de aproximadamente $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la parte superior de la estratosfera. Provocando entonces que las masas de aire más cálidas y menos densas se encuentran por encima de las más frías y densas, evitando así la convección; ya que no existe el movimiento vertical ascendente de los gases.

La composición química de esta capa corresponde a un 80% del ozono (O_3) de la atmósfera, concentrado en una capa llamada capa de ozono. Esta capa rodea todo el planeta con una concentración media de 10 ppm de ozono, y depende de la latitud y la época del año. Los mayores niveles se dan cerca de los polos, en los meses de marzo y abril en el norte y en noviembre en el sur mientras que en el ecuador la concentración es de

cerca del 50% respecto a los polos durante todo el año. La capa de ozono tiene una función muy importante de filtrado de algunas radiaciones ultravioleta de alta energía procedentes del Sol que se dan a esta altitud y que resultan muy perjudiciales para los seres vivos. Otros compuestos presentes en la estratosfera, minoritarios pero importantes desde el punto de vista de las reacciones químicas que se producen a esta altitud, son el metano (CH₄), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y los compuestos halogenados (Gallego et al., 2012, p. 17-18).

6.1.3. Mesosfera

En el portal de la NOAA (2023) se describe a la mesosfera como la capa que se extiende desde los 50 km hasta los 85 km sobre la superficie de la Tierra y en esta la temperatura decrece con la altitud, llegando a unos -15 °C en la parte más baja de esta capa. La parte superior de esta capa se conoce como mesopausa. Los gases en la mesosfera son lo suficientemente espesos como para frenar los meteoros que se dirigen a la atmósfera; quemándose y dejando estelas de fuego en el cielo nocturno.

6.1.4. Termosfera

Aproximadamente 85 km y 600 km se encuentra la termosfera, conocida como la atmósfera superior. Si bien aún son extremadamente delgados, los gases de la termosfera se vuelven cada vez más densos a medida que uno desciende hacia la Tierra (NOAA, 2023).

Como tal, la radiación ultravioleta y de rayos X de alta energía entrante del sol comienza a ser absorbida por las moléculas en esta capa y provoca un gran aumento de temperatura. Debido a esta absorción, la temperatura aumenta con la altura. Desde tan solo -120 °C en la parte inferior de esta capa, las temperaturas pueden alcanzar hasta 2000 °C cerca de la parte superior. Sin embargo, a pesar de la alta temperatura, esta capa de la atmósfera aún se sentiría muy fría en nuestra piel. La alta temperatura indica la cantidad de energía absorbida por las moléculas, pero con tan pocas moléculas en esta capa, el número total no sería suficiente para calentar (NOAA, 2023).

6.1.5. Exosfera

Esta es la capa más externa de la atmósfera. Se extiende desde aproximadamente 600 km hasta 10,000 km sobre la tierra. En esta capa, los átomos y las moléculas escapan al espacio y los satélites orbitan la tierra. En la parte inferior de la exosfera hay una capa de transición llamada termopausa (NOAA, 2023).

6.2. Contaminación atmosférica

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) la contaminación de la atmósfera comienza cuando cualquier agente químico, físico o biológico modifica sus características naturales (OMS, s.f.).

La Comisión Ambiental de la Megalópolis (CAME) (s.f., citado en SEMARNAT, 2018) refiere que, según la fuente emisora estas pueden agruparse en:

- Fuentes fijas: Las cuales son identificadas por permanecer en un punto fijo como plantas de energía, industrias químicas y fábricas.
- Fuentes móviles: Abarcan todas las formas de transporte y los vehículos automotores.
- Fuentes de área: Todas aquellas actividades que en conjunto afectan la calidad del aire, como el uso de madera, imprentas, tintorerías, actividades agrícolas, etc.
- Fuentes naturales o biogénicas: Son resultado de fenómenos de la vida animal y vegetal, entre ellos tenemos las emisiones producidas por los volcanes, océanos y la erosión del suelo.

Por otra parte, la CAME indicó que dependiendo el origen del contaminantes, estos se pueden dividir en dos tipos:

- Contaminantes primarios: Los cuales provienen directamente de la fuente de emisión como el plomo (Pb), monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SOx), óxidos de nitrógeno (NOx), hidrocarburos y material particulado (PM).

- Contaminantes secundarios: Son originados en el aire por la interacción entre dos o más contaminantes primarios o por sus reacciones con otros componentes de la atmósfera; como en los casos del ozono (O₃), peroxiacetil-nitrato (PAN), sulfatos, nitratos y el ácido sulfúrico (H₂SO₄).

Para la medición de la calidad del aire, si el contaminante es perjudicial para la salud y el bienestar de las personas, se les identifica como contaminantes criterio. Si no lo son, se les llama contaminantes no criterio (CAME, s.f., citado en SEMARNAT, 2018).

6.2.1. Principales contaminantes atmosféricos

La contaminación atmosférica es el resultado de una compleja mezcla de gases y partículas, con fuentes tanto naturales como de origen humano. En los Estados Unidos la EPA, o bien conocida en español como la Agencia de Protección Ambiental, establece los estándares conocidos como "normas nacionales de calidad del aire ambiental", mientras que en México, la SEMARNAT establece límites conocidos como Normas Ambientales para Aire. Los contaminantes criterio del aire incluyen el ozono (O₃), monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂) y las partículas en suspensión (PM₁₀, PM_{2.5}) (EPA, 2016). A continuación se describen estos contaminantes, según las definiciones del sitio oficial del Sistema de la Calidad del Aire del Estado de Durango (2019):

- a) Ozono: El ozono es un gas incoloro, con un olor irritante y muy reactivo. Es también una de las formas en las que se encuentra el oxígeno en la naturaleza, su molécula está formada por tres átomos de oxígeno (O₃). Al nivel de la troposfera se forma de la reacción entre los óxidos de nitrógeno emitidos durante la combustión de los hidrocarburos, por el uso de combustibles fósiles y por la vegetación, en presencia de la luz solar.
- b) Monóxido de carbono: Es un gas inodoro e incoloro, altamente tóxico, emitido principalmente durante la quema de combustibles o de cualquier material orgánico, cuando se realiza en una atmósfera con una cantidad de oxígeno limitada. Su presencia en la atmósfera en altas concentraciones es fatal para el ser humano.

- c) Dióxido de azufre: El dióxido de azufre (SO_2) es un gas tóxico, incoloro con un característico olor irritante; se produce de la quema de sustancias que contienen azufre como los combustibles derivados del petróleo, el carbón y la madera. De manera natural es emitido por las emisiones volcánicas. Es un precursor importante de la lluvia ácida, ya que en la atmósfera reacciona para formar ácido sulfúrico.
- d) Dióxido de nitrógeno: Los óxidos de nitrógeno son compuestos formados por átomos de oxígeno y nitrógeno, emitidos por los escapes de los automóviles, chimeneas, estufas, etc. Se forman durante la combustión por la reacción del oxígeno con el nitrógeno presente en el aire. El término genérico óxidos de nitrógeno (NO_x) se utiliza para referirse al óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO_2). Los NO_x son precursores de las partículas suspendidas y en la atmósfera pueden reaccionar para formar ácido nítrico y contribuir a la lluvia ácida.
- e) PM_{10} : Se denomina PM_{10} a aquellas pequeñas partículas dispersas en la atmósfera, y cuyo diámetro es menor que $10\ \mu\text{m}$ (10 micrómetros). Están formadas principalmente por compuestos inorgánicos como silicatos y aluminatos, metales pesados y material orgánico asociado a partículas de carbono.
- f) $\text{PM}_{2.5}$: Las partículas $\text{PM}_{2.5}$ son aquellas que cuentan con un diámetro aerodinámico inferior o igual a los 2.5 micrómetros, es decir, son 100 veces más delgadas que un cabello humano. En el caso de las $\text{PM}_{2.5}$, su origen está principalmente en fuentes de carácter antropogénico como las emisiones de los vehículos diésel.

La Tabla 2 extraída de la página web de la EPA (2016) compara las normas de calidad del aire para EE.UU. y México. La tabla incluye el período de tiempo a lo largo del cual se promedian las concentraciones del contaminante (es decir, el tiempo de exposición) y el valor numérico de cada norma. Los valores se proporcionan en partes por millón por volumen (ppm) y en microgramos por metro cúbico de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Tabla 2*Normatividad del aire ambiental basada en la salud*

Contaminante	Normatividad	
	Estados Unidos	México
Monóxido de carbono (CO)		
Promedio para 8 horas	9 ppm	11 ppm
Promedio para 1 hora	35 ppm	
Dióxido de nitrógeno (NO₂)		
Promedio anual	0.053 ppm	
Promedio para 1 hora		0.21 ppm
Ozono (O₃)		
Promedio para 8 horas	0.08 ppm	
Promedio para 1 hora	0.12 ppm	0.11 ppm
Dióxido de azufre (SO₂)		
Promedio anual	0.030 ppm	0.030 ppm
Promedio para 24 horas	0.14 ppm	0.13 ppm
Materia particulada de menos de 2.5 micrómetros (PM_{2.5})		
Promedio anual	15 µg/m ³	
Promedio para 24 horas	65 µg/m ³	
Materia particulada de menos de 10 micrómetros (PM₁₀)		
Promedio anual	50 µg/m ³	50 µg/m ³
Promedio para 24 horas	150 µg/m ³	150 µg/m ³
Materia particulada suspendida total (TSP)		
Promedio anual		75 µg/m ³
Promedio para 24 horas		260 µg/m ³

Fuente: De Normas de aire ambiental basadas en la salud, por Red de Transferencia de Tecnología Centro de Información Sobre Calidad del Aire para la frontera entre EE.UU. - México, 2016, EPA (https://www3.epa.gov/ttn/catc1/cica/airq_s.html). De dominio público.

6.2.2. Dispersión de los contaminantes en la atmósfera

Las emisiones contaminantes toman diferentes direcciones una vez que entran en contacto con la atmósfera. Los contaminantes del aire pueden viajar desde su punto de liberación cientos, incluso miles de kilómetros de todo el mundo. Según la EEA, conocida en español como la Agencia Europea de Medio Ambiente (2016) la dispersión de la contaminación atmosférica se ve manipulada por muchos factores:

- Condiciones meteorológicas (especialmente la velocidad del viento, la dirección del viento y la estabilidad atmosférica);
- La altura de emisión (por ejemplo, fuentes a nivel del suelo, como el tráfico rodado o fuentes de alto nivel, como chimeneas altas);
- Características geográficas locales y regionales;
- La fuente (por ejemplo, un punto fijo, como una chimenea, o un número difuso de fuentes, como automóviles y solventes).

Así mismo la EEA señaló que durante la dispersión los contaminantes pueden sufrir una gran variedad de alteraciones; son diluidos al mezclarse en el aire; son separados o acumulados dependiendo sus características físicas; pueden reaccionar y transformar el contaminante original en un nuevo compuesto; incluso algunos contaminantes pueden sedimentarse por efecto de la gravedad, o ser lavados por la lluvia, etc.

Por lo tanto, muchos contaminantes tienen patrones de dispersión extremadamente complejos, especialmente en lugares donde hay diferentes fuentes de emisión y variaciones en las condiciones ambientales, por lo tanto modelar estas emisiones resulta a menudo una dificultad (EEA, 2016).

6.2.3. La zafra azucarera y su contribución en la contaminación atmosférica

Se le conoce como zafra al tiempo que dura el proceso mediante el cual se cosecha la caña y se fabrica el azúcar, comenzando en noviembre y terminando en julio. La recolección se lleva a cabo entre los 11 y 16 meses de plantación, cuando los tallos dejan de desarrollarse, las hojas se marchitan y caen, del mismo modo la corteza de la capa se

vuelve quebradiza. Es en ese momento cuando la plantación se quema para eliminar aquella maleza que dificulta 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, ésta se apila a lo largo del campo y se recolecta a mano o a máquina para su transporte al ingenio azucarero (SADER, 2019; Representación de Agricultura en Puebla, 2018). La Figura 3 esquematiza este proceso:

Se estima que en el país se cultivan más de 800 mil hectáreas de caña de azúcar en 267 municipios de 15 Entidades Federativas, y de acuerdo con la FAOSTAT, que en español es la Base de Datos Estadísticos Corporativos de la Organización para la Agricultura y la Alimentación; México es uno de los productores de azúcar más relevantes, ocupando el sexto lugar a nivel mundial (promedio 2018-2021) por debajo de Brasil, India, China, Tailandia y Pakistán (FAOSTAT, 2023; SADER, 2021).

Si bien la práctica de quema a cielo abierto es útil para agilizar la recolección manual, también tiene un impacto en la contaminación atmosférica regional. En 2018 Mugica-Álvarez *et al.* demostró que la quema de caña de azúcar libera diferentes compuestos contaminantes como el CO₂, CO, CH₄, PM₁₀ y PM_{2.5}, HAPs y hasta 37 COVs. En lugares como Zacatepec, México durante la campaña de monitoreo las concentraciones de PM₁₀ y PM_{2.5} disminuyeron entre un 39% y un 43% cuando cesaron las actividades de quema de esta biomasa (Mugica-Alvarez et al., 2017). Se estimaron las emisiones de metano generadas por la quema de caña de azúcar para tres períodos de zafra: 2010/2011, 2011/2012 y 2012/2013. Se quemó más del 80% del área de cultivo de caña de azúcar en las zonas de oferta consideradas, y los estados con las áreas de mayor producción y cosecha (Veracruz, Jalisco y San Luis Potosí) también tuvieron los niveles más altos de emisiones de CH₄. El promedio de las emisiones nacionales totales de metano ascendió a 1,4 103 Mg, que es comparable a otros países productores de caña de azúcar relevantes como Brasil, India y Estados Unidos.

Figura 3

Etapas importantes durante el proceso de zafra



Fuente: Elaborado a partir de (SADER, 2019) y Representación de Agricultura en Puebla (2018).

6.2.4. Antecedentes en México sobre la zafra y sus efectos en la salud

Los impactos derivados de la quema de caña de azúcar han sido evaluados y estudiados en diferentes instituciones alrededor del país. En lo que respecta al Municipio de Izúcar de Matamoros, la información acerca de las consecuencias que tiene esta actividad es limitada y desactualizada. La última investigación referente a esta problemática fue publicada por Ruiz *et. al.* en el año 2004 en donde expone que las concentraciones de partículas suspendidas totales, PM_{10} y $PM_{2.5}$, fuera de la época de zafra descendieron un 50%, de igual manera los datos registrados por los centros de salud de Izúcar de Matamoros respecto a la incidencia de enfermedades respiratorias presentan una aparente relación entre la época de zafra y el incremento en la frecuencia de las enfermedades respiratorias.

Por otro lado, un estudio enfocado en determinar el daño cromosómico en trabajadores expuestos a las emisiones de la quema de caña en Sinaloa, México; determinó

que durante esta actividad se generan HAPs, los cuales representan un riesgo genotóxico para los trabajadores de esta importante zona productora (Martínez-Valenzuela *et al.*, 2015). Mientras tanto en Chiapas y Morelos para establecer la magnitud del problema de las emisiones de HAPs y PM, se realizaron muestreos durante la época de cosecha y no cosecha, con diferentes condiciones climáticas y sociales. Los resultados mostraron que durante la cosecha, la masa de PM₁₀ tuvo un aumento leve en Chiapas, pero aproximadamente el doble en Morelos, mientras que las concentraciones totales de HAPs aumentaron dos y seis veces, respectivamente. Además, del total de HAPs cuantificados, del 44% al 52% corresponden a compuestos cancerígenos, lo que indica que los riesgos para la salud se potencian durante la cosecha (Mugica-Alvarez *et al.*, 2015).

6.2.5. Legislación y normatividad mexicana

6.2.5.1. Marco normativo vigente referente a la calidad del aire ambiente

Como señala la Comisión Federal para la Protección Contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) (2017), en México la Secretaría de Salud es el órgano responsable de evaluar los impactos de la contaminación atmosférica en la salud y establecer los límites permisibles de concentración de los contaminantes en la atmósfera, esto con el fin de salvaguardar a los ciudadanos.

Ley General de Salud

La Ley General de Salud establece en su Título Séptimo, “Promoción de la Salud” Capítulo IV , “Efectos del Ambiente en la Salud” (Artículos 116 y 118 fracción I) que, en materia de efectos del ambiente en la salud de la población, corresponde a las autoridades sanitarias establecer normas, tomar medidas y realizar actividades para proteger la salud humana ante los riesgos y daños dependientes de las condiciones del ambiente, así como determinar los valores de concentración máxima permisibles para el ser humano de los contaminantes atmosféricos (SEMARNAT, 2018).

Referente a esta Ley la Secretaría de Salud ha emitido una serie de Normas Oficiales Mexicanas, las cuales se enlistan en la Tabla 3 con respecto a cada uno de los contaminantes criterio. En esta se encuentra el tipo de dato base que se utiliza en el cálculo y el tiempo para calcular la métrica, el tipo de exposición, la frecuencia tolerada, los valores límite, los criterios de suficiencia de información y la norma que corresponde a cada contaminante (SEMARNAT, 2018).

Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) en el artículo 111° fracción I señala como una de la facultades de la SEMARNAT en materia de prevención y control de la contaminación atmosférica, expedir las Normas Oficiales Mexicanas (ver Tabla 4) que establezcan la calidad ambiental de las distintas áreas, zonas o regiones del territorio nacional con base en los valores de concentración máxima permisible para la salud pública de contaminantes en el ambiente determinados por la Secretaría de Salud (SEMARNAT, 2018).

Aunado a esta ley se encuentra los siguientes Reglamentos en materia atmosférica:

- Reglamento de la LGEEPA en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera (25 de noviembre de 1988), revisado, reformado y publicado en el DOF el 31 de octubre de 2014.
- Reglamento de la LGEEPA en materia de Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC) (03 de junio de 2004), revisado, reformado y publicado en el DOF el 31 de octubre de 2014.

El Reglamento en materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera de la LGEEPA, señala en el Artículo 7° fracción IV, que es competencia de la Secretaría responsable del sector ambiental (actualmente SEMARNAT), la expedición de normas "para la certificación de la autoridad competente de los niveles de emisión de contaminantes a la atmósfera provenientes de fuentes determinadas" (SEMARNAT, 2018).

Tabla 3*Normas Oficiales Mexicanas de los contaminantes criterio*

Norma Oficial Mexicana	Contaminante	Dato	Exposición	Frecuencia tolerada	Valor límite
NOM-025-SSA1-2014	Partículas PM ₁₀	Promedio 24 horas	Aguda Crónica	No se permite	75 µg/m ³ Máximo 40 µg/m ³ Promedio anual
NOM-025-SSA1-2014	Partículas PM _{2.5}	Promedio 24 horas	Aguda Crónica	No se permite	45 µg/m ³ Máximo 12 µg/m ³ Promedio anual
NOM-020-SSA1-2014	Ozono	Dato horario Promedio móvil de 8 hora	Aguda	No se permite No se permite	0.095 ppm Máximo 0.070 ppm Máximo
NOM-022-SSA1-2010	Dióxido de azufre	Promedio de 8 hora Promedio de 24 hora Dato horario	Aguda Aguda Crónica	1 vez al año No se permite	0.200 ppm Segundo máximo 0.110 ppm Máximo 0.025 ppm Promedio anual
NOM-023-SSA1-1993	Dióxido de nitrógeno	Dato horario	Aguda	1 vez al año	0.210 ppm Segundo máximo
NOM-021-SSA1-1993	Monóxido de carbono	Promedio móvil de 8 horas	Aguda	1 vez al año	11 ppm Segundo máximo
NOM-026-SSA1-1993	Plomo	Promedio aritmético de tres meses	Crónica	No se permite	1.5 µg/m ³

Fuente: Adaptado de *Normas Oficiales Mexicanas de Calidad del Aire Ambiente*, por COFEPRIS, 2018, Gob

(<https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/4-normas-oficiales-mexicanas-nom-de-calidad-del-aire-ambiente>).

Dato = Dato base utilizado para la evaluación, Valor límite = Indicador con el que se evalúa.

Tabla 4

Normas Oficiales Mexicanas en lo que respecta a monitoreo ambiental

Norma Oficial Mexicana	Objetivo	Campo de aplicación
NOM-156-SEMARNAT-2012	Especificar las condiciones mínimas que deben ser observadas para el establecimiento y operación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire.	Todo el territorio nacional y es de observancia obligatoria para los gobiernos locales, según corresponda, en aquellas zonas o centros de población que cuenten con: <ul style="list-style-type: none">a) Asentamientos humanos con más de quinientos mil habitantes; zonas metropolitanas.b) Asentamientos humanos con emisiones superiores a veinte mil toneladas anuales de contaminantes criterio primarios a la atmósfera.c) Conurbaciones y actividad industrial que por sus características se requiera del establecimiento de estaciones de monitoreo de calidad del aire y/o de muestreo de contaminantes atmosféricos.
NOM-034-SEMARNAT-1993	Establece los métodos de medición para determinar la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.	Es de observancia obligatoria en la operación de los equipos, estaciones o sistemas de monitoreo de la calidad del aire con fines de difusión o información al público o cuando los resultados tengan validez oficial.

Norma Oficial Mexicana	Objetivo	Campo de aplicación
NOM-035-SEMARNAT-1993	Establece los métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales (PST) en el aire ambiente y el procedimiento para la calibración de equipos de medición.	Es de observancia obligatoria en la operación de los equipos, estaciones o sistemas de monitoreo de la calidad del aire con fines de difusión o información al público o cuando los resultados tengan validez oficial.
NOM-037-SEMARNAT-1993	Establece los métodos de medición para determinar la concentración de bióxido de nitrógeno (NO ₂) en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.	Es de observancia obligatoria en la operación de los equipos, estaciones o sistemas de monitoreo de la calidad del aire con fines de difusión o información al público o cuando los resultados tengan validez oficial.
NOM-038-SEMARNAT-1993	Establece los métodos de medición para determinar la concentración de bióxido de azufre (SO ₂) en el aire ambiente y los procedimientos para la calibración de los equipos de medición.	Es de observancia obligatoria en la operación de los equipos, estaciones o sistemas de monitoreo de la calidad del aire con fines de difusión o información al público o cuando los resultados tengan validez oficial.

Fuente: Adaptado de *Monitoreo Norma Oficial Mexicana*, de SEMARNAT, 2018, Gob (https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2018/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServletd54a.html).

6.2.5.2. NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007

La NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007 establece las especificaciones técnicas de métodos de uso del fuego en los terrenos forestales y en los terrenos de uso agropecuario; la vigilancia del cumplimiento corresponde a la SEMARNAT, a través de Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA) y la Secretaría de Agricultura y SAGARPA, así como a los gobiernos de los estados y autoridades municipales (SEMARNAT y SAGARPA, 2007).

Las especificaciones para el uso del fuego en terreno agropecuario de acuerdo con la NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007, establecen en el punto 5.2 que:

- Las personas interesadas en hacer uso del fuego en este tipo de terrenos, deberán aplicar el método de quema controlada o el método de quema prescrita conforme al anexo técnico de la presente norma (p, 5.2.1).
- La SAGARPA, promoverá y capacitará a los productores agrícolas y ganaderos, en el uso del fuego y de otras alternativas técnicas para la preparación del terreno y control de plagas, que eviten el uso del fuego, tales como el aprovechamiento de esquilmos; la incorporación de esquilmos al suelo; labranza mínima, abonos verdes, cultivos de cobertera, control biológico y manejo integrado de plagas, planificación del pastoreo, establecimiento de praderas y tratamiento localizado de pastizales lignificados (p, 5.2.2).

Ahora bien, en el punto 6 de la NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007 se describe que el procedimiento para evaluar la conformidad (PEC) podrá ser utilizado por cualquier persona física o moral que utilice los métodos de uso del fuego en los terrenos de uso agropecuario, con el propósito de prevenir y disminuir los incendios forestales, además será realizado por conducto de un tercero debidamente acreditado y aprobado por la Secretaría, de conformidad a lo establecido en la Ley Federal sobre Metrología y Normalización (SEMARNAT y SAGARPA, 2007, p. 6.1-6.2). Conjuntamente será necesario constatar las

actividades que se realizarán previas a la quema, durante la quema y después de la quema (p, 6.4.1), cómo se enlistan en la Tabla 5 para los métodos de quema controlada y quema prescrita.

Tabla 5

Tabla comparativa entre los métodos de quema controlada y prescrita

Quema controlada	Quema prescrita
Actividades previas a la quema:	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Delimitar el área de quema con brechas cortafuego, líneas negras, barreras naturales o artificiales. 2. Apilar el material combustible en el área de quema. 3. Extraer material vegetal para reducir la carga de combustible. 4. Verificar que no existían quemados/incendios forestales en un radio no menor a 10 km. 5. Comunicar a los propietarios de los terrenos vecinos. 6. Organizar previamente a los participantes: jefe de la quema, jefe de ignición, jefe de control, jefe de liquidación. 7. Establecer rutas de escape y zonas de seguridad para protección de las personas participantes en la quema. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Presentar ante la autoridad competente el Formato del Método de Quema Prescrita. 2. El Formato deberá considerar el comportamiento de fuego deseado dada la topografía, los combustibles y el tiempo atmosférico. Así como la capacidad física, experiencia y entrenamiento del personal técnico que conducirá la quema. 3. Las personas que participen en la quema prescrita deberán atender los criterios técnicos del Sistema para Manejar Emergencias establecido por la Comisión. 4. El Formato señala los trabajos que el usuario realizará para la preparación del sitio de la quema. 5. Extraer material vegetal aprovechable para reducir las cargas de combustible. 6. Verificar que no existían quemados/incendios forestales en terrenos vecinos a un radio no menor a 10 km.

Quema controlada	Quema prescrita
	<ol style="list-style-type: none"> 7. Comunicar a los propietarios de los terrenos vecinos y entregar el aviso de uso del fuego a la autoridad del núcleo agrario correspondiente. 8. Establecer rutas de escape y zonas de seguridad para protección de las personas participantes en la quema.
Durante la quema:	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Mantener el control del fuego dentro del área delimitada. 2. Asegurar que no se generen focos secundarios con el fuego. 3. Contar con los recursos para la ejecución de la quema: herramientas manuales y recursos humanos conforme a la extensión del terreno (ha). 4. Evaluar las condiciones meteorológicas: velocidad del viento, las temperaturas y la sequía. De ser extremas, posponer la quema hasta que las condiciones sean adecuadas. 5. Permanecer desde el inicio y hasta el final de la quema para mantener el fuego bajo control. Las quemas deben realizarse preferentemente por las mañanas como máximo hasta las 11 horas, con vientos menores a 10 km/h y humedad relativa mayor a 40%. 6. Realizar los trabajos de liquidación del fuego de manera simultánea al inicio de la quema y se realizó a partir del perímetro y hasta un mínimo de 10 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Un día anterior o el mismo día de la quema, el usuario con la asistencia de la Comisión realiza ante las personas participantes, una verificación en campo sobre la información descrita en el Formato del Método de Quema Prescrita cuyas actividades más importantes son verificar el final de las condiciones del sitio de quema; que todo el personal conoce el objetivo de la quema, la organización, las asignaciones, los esquemas de radiocomunicación, los procedimientos; capacitación del personal, condiciones del equipo y herramientas, plan de ignición, plan de contingencia, procedimientos de liquidación. 2. Una vez que se está realizando la quema se verifica que se mantuvo el control del fuego dentro del área destinada a la quema; se cuidaron y se atendieron los focos secundarios generados en la quema. 3. El usuario cuenta con las herramientas y equipo de personas suficiente para

Quema controlada	Quema prescrita
<p>metros hacia dentro del área quemada de tal manera que no existió material incandescente o encendido, sobre dicha franja.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li data-bbox="213 479 794 562">7. Que existió una extinción total y se redujo el riesgo de reigniciones. <li data-bbox="213 577 794 815">8. Que en caso de haberse generado un incendio forestal, utilizó los medios a su alcance para controlarlo y en caso contrario dio aviso a la autoridad competente. 	<p>mantener bajo control el fuego durante la ejecución de la quema prescrita.</p> <ol style="list-style-type: none"> <li data-bbox="818 376 1396 663">4. Se evaluaron las condiciones meteorológicas (velocidad del viento, la temperatura y la sequía). Si éstas fueron extremas pospuso la quema hasta que las condiciones fueran adecuadas. <li data-bbox="818 678 1396 869">5. El personal participante debe estar presente desde el inicio y hasta el final de la quema para mantener el fuego bajo control. <li data-bbox="818 884 1396 1272">6. Se realizaron los trabajos de liquidación del fuego de manera simultánea al inicio de la quema y se realizó a partir del perímetro y hasta un mínimo de 10 metros hacia dentro del área quemada, de tal manera que no existió material incandescente o encendido sobre dicha franja. <li data-bbox="818 1288 1396 1525">7. Que existió una extinción total y se redujo el riesgo de reigniciones, que hubieran favorecido la presencia de incendios forestales o daños a la propiedad vecina. <li data-bbox="818 1541 1396 1827">8. Que en caso de haberse generado un incendio forestal, aplicó el plan de contingencia, utilizó los medios a su alcance para controlarlo y en caso contrario dio aviso a la autoridad competente.

Quema controlada	Quema prescrita
Después de la quema:	
<ol style="list-style-type: none"> 1. Se evitaron incendios forestales y no se dañó la propiedad vecina. 2. Se verificó que el personal esté seguro. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Que se evitaron incendios forestales y no se dañó la propiedad vecina; 2. Que se evitaron accidentes personales derivados del uso del fuego, y 3. Que se cumplieron los objetivos establecidos en el Formato del Método de Quema Prescrita.

Fuente: Elaborado a partir de NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007 por SEMARNAT (2007) y SAGARPA (2007).

Dentro del Anexo técnico de la NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007 hay una serie de contenidos formulados por la Comisión Nacional Forestal en colaboración con The Nature Conservancy-Programa México en donde se detalla más sobre el manejo del fuego para reducir al mínimo los efectos dañinos y potenciar los efectos benéficos del mismo. Esto demanda que las personas que usan el fuego en las áreas rurales consideren identificar si el ecosistema donde se encuentra ubicado el terreno es:

- Ecosistema dependiente del fuego: El fuego en algunas ocasiones tiene efectos benéficos en ciertos ecosistemas forestales. Así un fuego con llamas pequeñas (de 30 cm, por ejemplo) puede ser benéfico para la regeneración de algunos pinares cuyos conos o piñas son serótinicos, es decir, sólo liberan las semillas cuando son expuestos a determinadas temperaturas que un fuego de baja intensidad les puede proporcionar.
- Ecosistema sensible al fuego: Existen otros ecosistemas donde la mínima presencia de fuego puede dañar severamente las funciones ecológicas y las especies que ahí habitan. Un fuego con llamas de 30 cm, como el señalado en el ejemplo de los pinares, puede ser muy dañino para las selvas tropicales, provocando mortalidad de

arbolado y severos daños al hábitat de especies como el jaguar, mono araña y las aves.

- Ecosistema influido por el fuego: Existen también ecosistemas intermedios, localizados en la transición de los ecosistemas dependientes del fuego y de los ecosistemas sensibles al fuego, que comparten especies tanto de uno como de otro ecosistema; la presencia del fuego puede crear nichos y hábitat específicos que favorecen la biodiversidad. Ejemplo de estos son: los bosques de galería, las selvas inundadas o bajos entre las sábanas, la selva mediana subperennifolia, etc.
- Ecosistema independiente del fuego: Hay otro tipo de ecosistemas que no se queman, aun cuando la fuente de ignición se encuentre presente. En estos ecosistemas no puede haber ignición debido a que no tienen continuidad de la vegetación o ésta es escasa, tienen presencia de agua o son muy fríos.

Por otra parte, para que se produzca el fuego se necesitan tres elementos; calor, oxígeno y combustible. En la naturaleza el oxígeno es abundante en el aire y las personas no tienen control sobre él. La fuente de calor puede ser natural (como los rayos, erupción de volcanes) o de origen humano (las quemadas en áreas rurales en general). El combustible, está constituido por la vegetación viva y muerta. Este elemento es muy importante y es posible manejarlo tanto en los bosques como en las áreas agrícolas y ganaderas para el control de la combustión en una quema controlada o prescrita. Entre sus características están:

- Tamaño y forma: Los combustibles se clasifican por su tamaño en ligeros, medianos y pesados. El combustible ligero (hojarasca, pasto o materia orgánica en descomposición) arde y se consume rápidamente. El combustible mediano (ramas, raíces y conos), así como el combustible pesado (troncos y árboles muertos) tarda más tiempo en encender y en consumirse.
- Humedad: Por regla general, el combustible ligero gana o pierde humedad en un tiempo corto en comparación con el combustible pesado, así la humedad del

combustible ligero cambia mucho durante el día, mientras que el combustible pesado para cambiar su contenido de humedad requiere de varios días.

- Cantidad de combustible muerto en un terreno: En terrenos agrícolas y ganaderos también hay combustibles muertos como los pastos secos o en reposo, las hierbas anuales, la vegetación cortada para preparar el terreno agrícola, los rastrojos, las hojas secas de los cañaverales y entre mayor sea la cantidad de combustible, la propagación del fuego será mayor, la intensidad será más alta y el comportamiento del fuego será más inestable.
- Densidad de la madera: La densidad de la madera determina la capacidad calórica de los combustibles. Maderas pesadas como el guayacán y el encino, tienen la capacidad de absorber más calor, que la madera ligera como la de pino. Esto es importante, ya que de ello depende el tiempo que tarde un combustible para empezar a arder, entre más pesado sea requerirá de más tiempo para alcanzar la ignición, pero una vez que la alcance tardará más tiempo en mantenerse encendido o en combustión.
- Sustancias químicas: Algunos combustibles contienen sustancias químicas como resina, aceites, cera, etc., lo que les otorga mayor facilidad para alcanzar la ignición.

También es importante tomar en cuenta el tiempo atmosférico, ya que los siguientes factores tienen influencia sobre la ignición de los combustibles:

- Temperatura: Entre más elevada sea la temperatura más baja será la humedad del ambiente y por tanto los combustibles ligeros perderán humedad, secándose rápidamente. Esto los hará arder con mayor facilidad.
- Humedad relativa: Es la cantidad de vapor de agua presente en cierto volumen de aire. Esta es importante ya que un combustible muerto tiene la capacidad de absorber y liberar humedad del ambiente que le rodea, es decir cuando el contenido de humedad de los combustibles muertos es mayor que la humedad del ambiente, el contenido de agua del combustible se evapora (pierde humedad). Cuando la humedad del ambiente es mayor que la humedad contenida en el combustible, este

último absorbe humedad del aire (gana humedad). La humedad de equilibrio se logra cuando se equilibra la humedad del combustible con la humedad ambiental. El tiempo empleado para conseguir una nueva humedad de equilibrio distinta a la inicial al cambiar las condiciones ambientales se denomina tiempo de retardación. Este se mide en horas y aumenta progresivamente con el grosor de los combustibles, con base en esta variable se clasifica a los combustibles en combustibles de 1 hora (pastos y hojas), 10 horas (ramas delgadas), 100 horas (ramas gruesas) y 1000 horas (troncos de árboles).

- Viento: El viento es el elemento más importante del tiempo atmosférico ya que aporta oxígeno al fuego, con lo cual se aviva y se mantiene la combustión. Además, influye en el secado de los combustibles a través de su velocidad. También es importante su dirección, la cual influye en la dirección de propagación de las llamas de un incendio.

Por último, se definen los aspectos relacionados con la topografía:

- Pendiente: Es el grado de inclinación del terreno con respecto a un plano horizontal del mismo, la pendiente tiene una gran influencia en la velocidad de propagación de un incendio o una quema. Por ejemplo, en terrenos con mucha pendiente el fuego avanzará con una mayor velocidad de propagación de abajo hacia arriba (a favor de la pendiente).
- Exposición: Es la orientación del terreno con respecto a los rayos del sol, tomando en cuenta los puntos cardinales (Norte, Sur, Este y Oeste). Los rayos solares llegan de diferente manera al terreno dependiendo de su exposición. En México, en una superficie de cualquier terreno, la exposición Sur es la que recibe mayor cantidad de rayos solares, en los lugares con exposición Sur la humedad relativa es baja debido a mayores temperaturas e insolación más intensa, y por tanto son sitios más secos, con menos vegetación la cual madura rápidamente en el verano. La situación inversa se encuentra en áreas con exposición Norte.

- **Altitud del terreno:** Es la altura de un terreno con relación al nivel medio del mar. Esta influye en forma directa en la temperatura, la precipitación, la humedad relativa y en los tipos de vegetación. En las partes bajas las temperaturas son mayores y por tanto los combustibles se encuentran más secos.

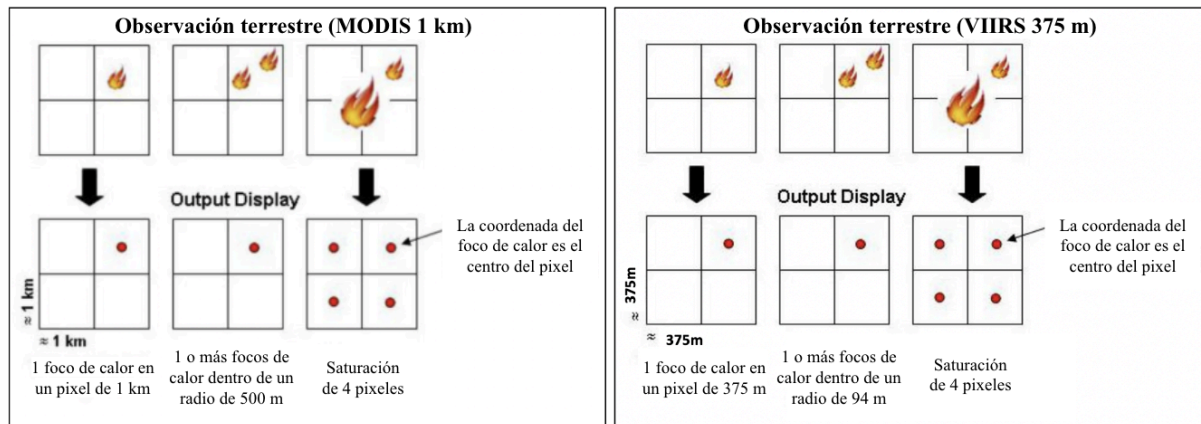
6.3. FIRMS NASA

FIRMS fue desarrollado en 2007 por la Universidad de Maryland, con fondos del Programa de Ciencias Aplicadas de la NASA y la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. FIRMS proporciona la ubicación de incendios activos en tiempo casi real utilizando observaciones satelitales de los instrumentos: MODIS, abreviatura de Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada, está presente en los satélites Aqua y Terra, mientras que VIIRS, conocido como el Conjunto de Radiómetros de Imágenes de Infrarrojos Visibles, se encuentra a bordo de los satélites SNPP y NOAA 20. El SNPP es un satélite de la Asociación Nacional de Órbita Polar de Suomi, mientras que NOAA 20 es un satélite de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica en su última versión (formalmente conocido como JPSS-1). (NASA, 2021).

Los satélites toman una "instantánea" de los eventos a medida que pasan sobre la Tierra. Cada foco de calor o incendio representa el centro de un píxel marcado como que contiene uno o más incendios u otras anomalías térmicas (como volcanes). Para MODIS el píxel es de aproximadamente 1 km y para VIIRS el píxel es de aproximadamente 375 m. Las coordenadas del foco de calor es el punto central del píxel y no necesariamente corresponde a las coordenadas del incendio real (Figura 4). No podemos determinar el tamaño exacto del incendio; lo que sí sabemos es que al menos un incendio se encuentra dentro del píxel marcado (NASA, 2024). Además, la base de datos obtenida por FIRMS proporciona información relevante sobre los focos de calor, los cuales se describen en la Tabla 6.

Figura 4

Observación terrestre de los instrumentos MODIS y VIIRS



Fuente: Adaptado de *What does a fire detection mean on the ground?*, por EarthData, 2024, NASA (<https://www.earthdata.nasa.gov/faq/firms-faq>). De dominio público.

Tabla 6

Atributos de los focos de calor obtenidos por el satélite SNPP, instrumento VIIRS

Atributo	Significado	Descripción
Latitud	Latitud	Centro del píxel de incendio nominal de 375 m.
Longitud	Longitud	Centro del píxel de incendio nominal de 375 m.
Bright_ti4	Temperatura de brillo I-4	Temperatura de brillo del canal VIIRS I-4 del píxel de de brillo I-4 fuego medida en Kelvin.
Scan	Tamaño de píxel de escaneo	El algoritmo produce aproximadamente 375 m de píxeles en el nadir. El escaneo y seguimiento reflejan el tamaño real de los píxeles.
Track	Tamaño de píxel a lo largo de la pista	El algoritmo produce aproximadamente 375 m de píxeles en el nadir. El escaneo y seguimiento reflejan el tamaño real de los píxeles.
Aqc_Date	Fecha de adquisición	Fecha de adquisición de VIIRS.

Atributo	Significado	Descripción
Acq_Time	Tiempo de adquisición	Hora de adquisición/sobrevuelo del satélite (en UTC).
Satellite	Satélite	N = Asociación Nacional de Órbita Polar Suomi
Confidence	Confianza	<p>Este valor se basa en una colección de cantidades intermedias del algoritmo utilizadas en el proceso de detección. Está pensado para ayudar a los usuarios a medir la calidad de los píxeles individuales de puntos de calor/incendios. Los valores de confianza se establecen en bajo, nominal y alto. Los píxeles de fuego diurno de baja confianza están típicamente asociados con áreas de destellos solares y anomalías de temperatura relativa más bajas (<15 K) en el canal I4 del infrarrojo medio. Los píxeles de confianza nominal son aquellos libres de contaminación por destellos solares durante el día y marcados por una anomalía de temperatura fuerte (>15 K) en los datos diurnos o nocturnos. Los píxeles de fuego de alta confianza están asociados a píxeles saturados durante el día o la noche.</p> <p>Fuente: Los píxeles nocturnos de baja fiabilidad sólo se producen en el área geográfica que se extiende desde 11° E hasta 110° O y desde 7° N hasta 55° S. Esta área describe la región de influencia de la Anomalía Magnética del Atlántico Sur, que puede causar temperaturas de brillo espurias en el canal I4 del infrarrojo medio, dando lugar a posibles falsas alarmas positivas. Éstas han sido eliminadas de los datos NRT distribuidos por FIRMS.</p>
Version	Versión (Colección y fuente)	La versión identifica la colección (p. ej., Colección VIIRS 1 o Colección VIIRS 2) y la fuente de procesamiento de datos (Tiempo ultrareal (sufijo URT agregado a la colección), Tiempo real (sufijo RT), Tiempo casi real (sufijo NRT) o Procesamiento estándar (solo colección).
Bright_ti5	Temperatura	Temperatura de brillo del canal I-5 del píxel de fuego

Atributo	Significado	Descripción
	de brillo I-5	medida en Kelvin.
Frp	Potencia radiativa de fuego	FRP representa la potencia radiativa del fuego integrada en píxeles en megavatios (MW). Dada la resolución espacial y espectral única de los datos, el algoritmo de detección de incendios VIIRS 375 m se personalizó y ajustó para optimizar su respuesta en incendios pequeños y, al mismo tiempo, equilibrar la aparición de falsas alarmas. La saturación frecuente del canal I4 del infrarrojo medio (3,55-3,93 μm) que impulsa la detección de incendios activos requiere pruebas y procedimientos adicionales para evitar errores de clasificación de píxeles. Como resultado, la caracterización de incendios de subpíxeles (por ejemplo, recuperación de la potencia radiativa del fuego [FRP]) solo es viable en incendios pequeños y/o de baja intensidad. Las recuperaciones sistemáticas de FRP se basan en un enfoque híbrido que combina datos de 375 y 750 m. De hecho, a partir de 2015, el algoritmo incorporó datos adicionales del canal VIIRS M13 (3,973-4,128 μm) de 750 m, tanto en formato agregado como no agregado.
Type*	Tipo de punto caliente inferido	0 = presunto incendio de vegetación 1 = volcán activo 2 = otra fuente terrestre estática 3 = detección en alta mar (incluye todas las detecciones sobre el agua)
DayNight	Día/Noche	D= Incendio diurno, N= Incendio nocturno

Fuente: Adaptado de *Attributes Fields*, de Earthdata NASA, 2024, Earthdata (doi:10.5067/FIRMS/VIIRS/VNP14IMGT_NRT.002).

6.4. Modelos de dispersión atmosférica

Los modelos son herramientas imprescindibles en el estudio de los contaminantes atmosféricos que interpretan los procesos complejos de difusión, transporte y depósito que se producen en la atmósfera. Así, mediante ecuaciones y algoritmos, se implementan y describen determinados procesos físico-químicos que hacen posible estimar el comportamiento de los contaminantes, su dispersión y su transformación química, permitiendo la predicción y estimación de la calidad del aire en una determinada zona (Gallego *et al.*, 2012, p. 112-113).

Una de las principales aplicaciones de los modelos de contaminación ha sido con fines normativos, esencialmente a escala local o regional, en este caso los resultados de la estimación de los parámetros se han utilizado para conceder permisos de emisión (generalmente para fuentes puntuales) o para realizar estudios de impacto ambiental o de riesgo sobre la posible evolución de los contaminantes y sus efectos. En general, los modelos aplicados con este propósito han estimado la distribución espacial y temporal de una emisión comparándolos con los valores guías de calidad del aire establecidos. También se han utilizado para elaborar propuestas de redes de medida o programas de calidad ambiental y prevención, etc. (Gallego *et al.*, 2012, p. 112-113).

De acuerdo con Gallego *et al.* (2012) se han desarrollado un gran número de modelos existiendo múltiples formas de clasificarlos según:

- La escala espacial (global, regionales o nacionales, de medio alcance y locales);
- La escala temporal: climatológicos (estacional o anual), dinámicos (valores hora a hora) y episódicos (fumigaciones, desplome, etc.);
- El tratamiento de la ecuación de transporte (Eulerianos y Lagrangianos);
- El tratamiento de los procesos (químicos, depósito húmedo y seco).

6.4.1. Enfoque Lagrangiano y Euleriano

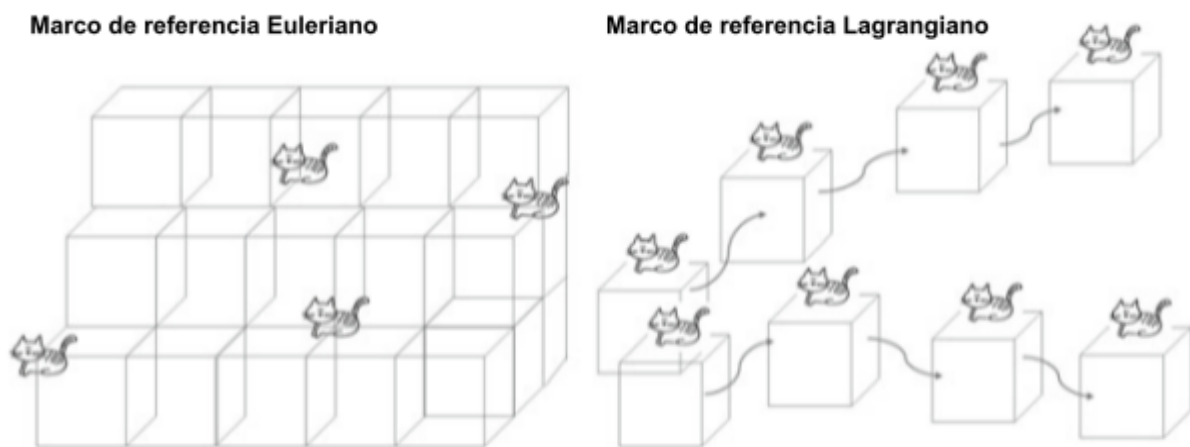
Para estudiar la dispersión atmosférica bajo estos enfoques es necesario definir lo que es una parcela de aire, la cual es una porción de la atmósfera: suficientemente grande

para contener varias moléculas y tener propiedades físicas bien definidas (temperatura, densidad, humedad, concentración de contaminantes) y suficientemente pequeña para ser considerada infinitesimal, una unidad (Trini, 2021).

Considerando una parcela de aire, en el sistema de referencia Euleriano un observador está fijo en el espacio y está estacionario en el tiempo t , de modo que sigue los cambios en una variable $\varphi(t)$ a medida que la parcela se mueve por su posición (x, y, z) . En cambio, en el sistema de referencia Lagrangiano, el observador es integral con la parcela de aire y se mueve con ella, siguiendo así los cambios de la variable $\varphi(t; x, y, z)$ a medida que la parcela se mueve en la atmósfera, en la Figura 5 se representa lo anterior dicho con parcelas de aire (cajas) y observadores (gatos) (Trini, 2021).

Figura 5

Marco de referencia Euleriano y Lagrangiano



Fuente: De The Lagrangian Approach to Dispersion Modeling: Why We Like It (and What We Did with It), por S. Trini, 2021, (https://doi.org/10.1007/978-3-662-63760-9_31).

En ecuaciones, esto implica que la tasa de cambio de una variable de estado en el marco de Lagrange está determinada por la Ecuación 1, que no es más que derivada total:

$$\frac{d\varphi}{dt} = S \quad (1)$$

En el marco Euleriano se puede reescribir como la Ecuación 2:

$$\frac{\partial\varphi}{\partial t} + u \cdot \nabla\varphi = S \quad (2)$$

donde t es el tiempo, S representa el término fuente y u la velocidad.

En el modelado numérico, esto se traduce en: los modelos eulerianos resuelven las ecuaciones de conservación dinámica en cada punto de cuadrícula (x, y, z) de una cuadrícula 3D numérica; Los modelos lagrangianos son en sí mismos "sin cuadrícula" y resuelven la trayectoria de una parcela en un dominio 3D, interpolando en la posición de la parcela las variables meteorológicas necesarias para impulsar su movimiento (Trini, 2021).

6.4.3. Modelo HYSPLIT

El modelo HYSPLIT fue desarrollado por NOAA y es un servicio del Laboratorio de Recursos Atmosféricos desde 1997. Es un sistema completo para calcular trayectorias de parcelas simples de aire, así como simulaciones complejas de transporte, dispersión, transformación química y deposición. Este modelo se ha utilizado en una variedad de simulaciones que describen el transporte atmosférico, la dispersión y la deposición de contaminantes y materiales peligrosos. Algunos ejemplos de las aplicaciones incluyen el seguimiento y el pronóstico de la liberación de material radiactivo, humo de incendios forestales, polvo arrastrado por el viento, contaminantes de diversas fuentes de emisión estacionarias y móviles, alérgenos y cenizas volcánicas.

El método de cálculo del modelo es un híbrido entre el enfoque Lagrangiano, que utiliza un marco de referencia móvil para los cálculos de advección y difusión a medida que las trayectorias o paquetes de aire se mueven desde su ubicación inicial, y la metodología Euleriana, que utiliza una cuadrícula tridimensional fija como un marco de referencia para calcular las concentraciones de contaminantes en el aire. HYSPLIT utiliza un método de advección pronóstico-corrector en la integración hacia adelante o hacia atrás (en el tiempo). Realiza una interpolación lineal espacial y temporal de la meteorología (externa y fuera de línea). Además, posee software para convertir de diferentes fuentes de datos meteorológicos para: AWR, ECMWF, RAMS, MM5, NMM, GFS entre otros. Para el mezclado vertical se emplea la similitud de Surface Layer (SL), boundary layer (BL), Ri o (Turbulen Kinetic Energy) TKE. El mezclado horizontal basado en la deformación de velocidad, con similitud SL o TKE, emplea coeficientes de mezclado para la difusión a partir de las variaciones de velocidad. La dispersión se calcula con base en partículas en 3D, para nubes o ambas simultáneamente, y las distribuciones de las nubes de partículas pueden ser Top-Hat o Gaussianas. Por último, las concentraciones se estiman a partir del número de partículas en la celda o nube (García, 2023). Es importante mencionar que HYSPLIT no incorpora los efectos de reacciones químicas, gases densos, subproductos de incendios, explosiones o reacciones químicas, gases liberados que no son neutros en flotabilidad, depósito (a menos que el usuario ingrese los parámetros apropiados de deposición húmeda y seca), transporte de partículas (a menos que el usuario ingrese el tamaño, tasas de deposición, etc. de la partícula), terreno complejo, variación en la tasa de emisión con el tiempo (excepto para la simulación de quemas controladas) y variación en la tasa de emisión con la altura (excepto para la simulación de cenizas volcánicas) (NOAA, s.f.).

Tal como se explica García (2023) en el Curso - Taller para pronóstico de la calidad del aire, a través del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático (ICAYCC); los elementos principales de HYSPLIT incluyen:

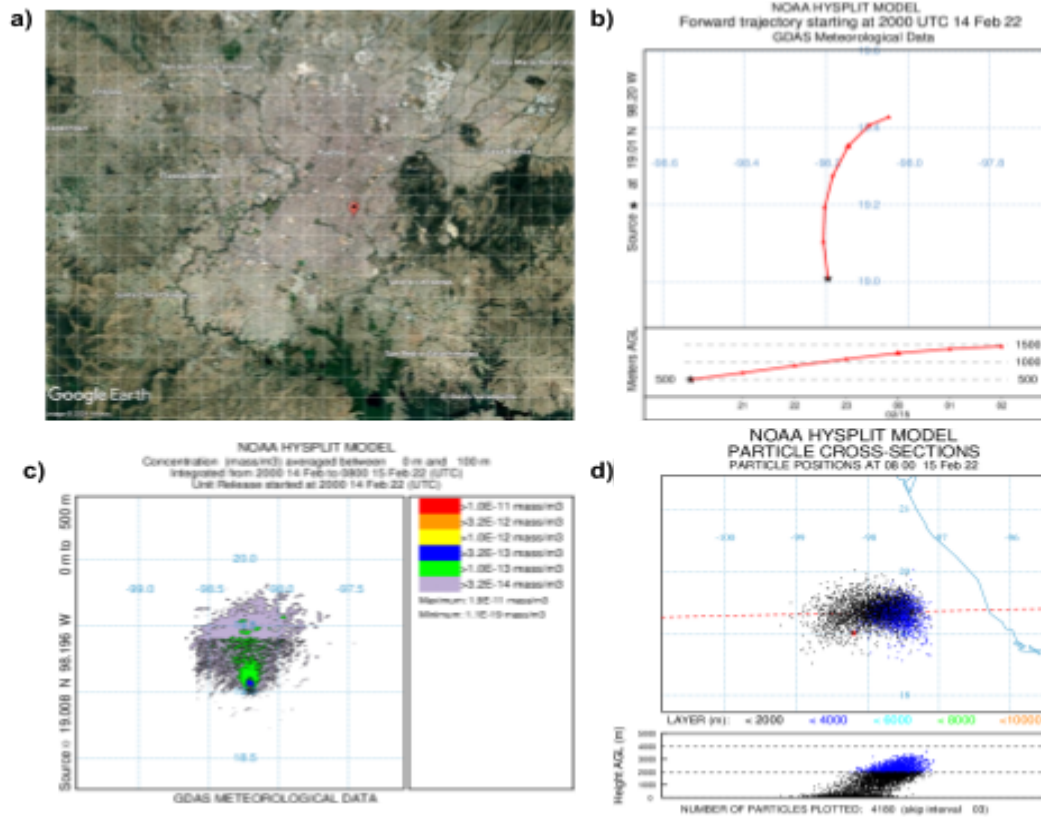
- Meteorología: Como la dirección del viento, la velocidad, la temperatura y la humedad, se proporcionan en una cuadrícula espaciada regular en múltiples niveles

de la atmósfera. En la Figura 6a se muestra una ubicación (en la ciudad de Puebla) dentro de la cuadrícula, la cual cuenta con los valores antes mencionados.

- Trayectorias: Es la ruta de un solo punto hipotético que se lleva pasivamente con el viento medio. Los datos meteorológicos se actualizan en cada paso de integración. La Figura 6b muestra la ubicación inicial de la ciudad de Puebla; los puntos muestran cada hora de las proyecciones horizontal y vertical.
- Concentración en el aire: Las concentraciones de aire se calculan sumando la masa de las partículas computacionales y dividiéndolas por el volumen de su distribución horizontal y vertical. En la Figura 6c, el promedio de partículas se tomó durante 12 horas, la duración del cálculo, y la masa total de partículas fue una unidad de emisión para la misma ubicación.
- Dispersión: Se introduce calculando la trayectoria de muchos puntos. Sin embargo, cada trayectoria se ve perturbada por la turbulencia atmosférica aleatoria a lo largo de su recorrido. En el ejemplo de la Figura 6d, se liberaron 4180 partículas desde la ciudad de Puebla y su posición se muestra cada hora.

Figura 6

(a) Ubicación de Puebla, por Google Earth, 2024 (b) Trayectoria inicial de emisión, (c) Concentraciones y (d) Dispersión de partículas.



Fuente: NOAA, 2024. De dominio público.

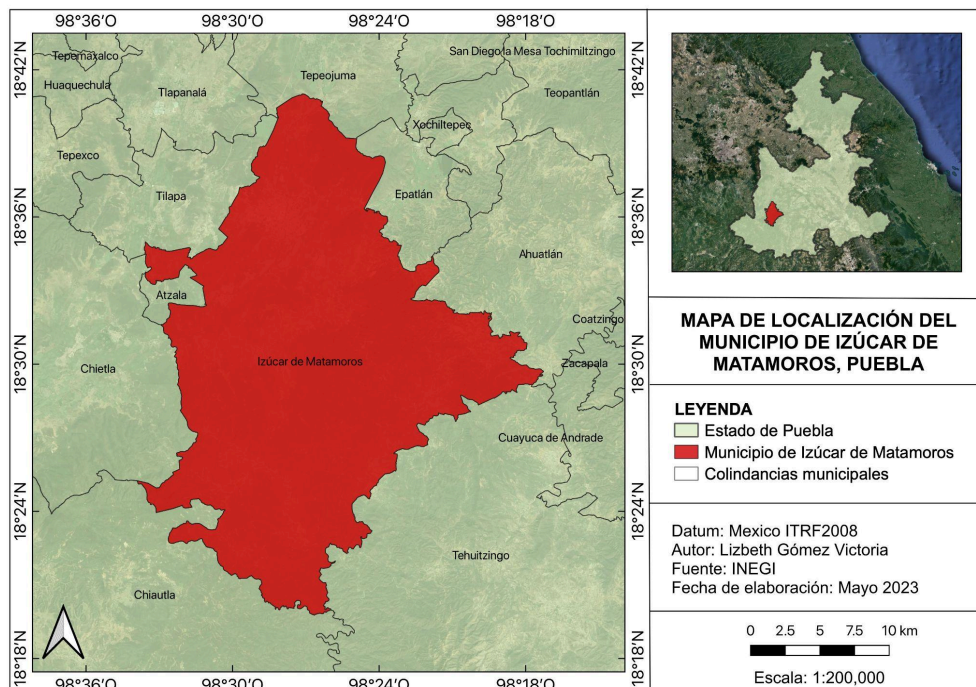
7. Metodología

7.1. Descripción del área de estudio

El municipio de Izúcar de Matamoros se localiza en la parte suroeste del estado de Puebla. Sus coordenadas son 18°36'08" latitud norte; 98°27'55" de longitud oeste. Al norte limita con Tepeojuma, al sur limita con Chiautla de Tapia, al oeste limita con San Juan Epatlán, Ahuatlán y Tehuiztingo y al poniente limita con Tlapanalá, Tilapa, Atzala y Chietla (ver Figura 7). Tiene una extensión territorial de 538.728 kilómetros cuadrados y ocupa el 1.6% de la superficie del estado de Puebla. La Figura 8 muestra que el uso del suelo para la agricultura representa un 36% del total de superficie y zona urbana 6%, el resto tenemos presencia de Selva (57%) y bosque (1%) (Gobierno de Izúcar de Matamoros, s.f.).

Figura 7

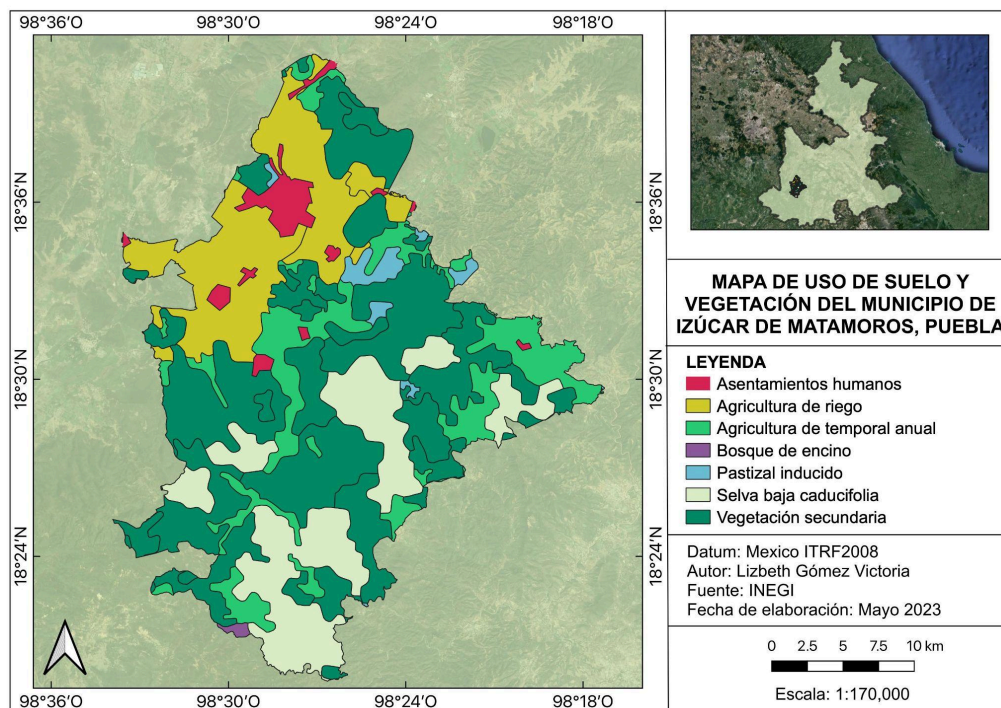
Mapa de localización del municipio de Izúcar de Matamoros, Puebla



Fuente: Elaborado a partir de *Marco Geoestadístico*, de INEGI (2022), (<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463770541>). Todos los derechos reservados 2022 por Licenciario. Adaptado con permiso del autor.

Figura 8

Mapa de uso de suelo y vegetación del municipio de Izúcar de Matamoros, Puebla



Fuente: Elaborado a partir de *Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VII*, de INEGI 2021, CONABIO (http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/usv/inegi/usv250s7gw). Todos los derechos reservados 2021 por Licenciatario. Adaptado con permiso del autor.

7.2. Recopilación de datos

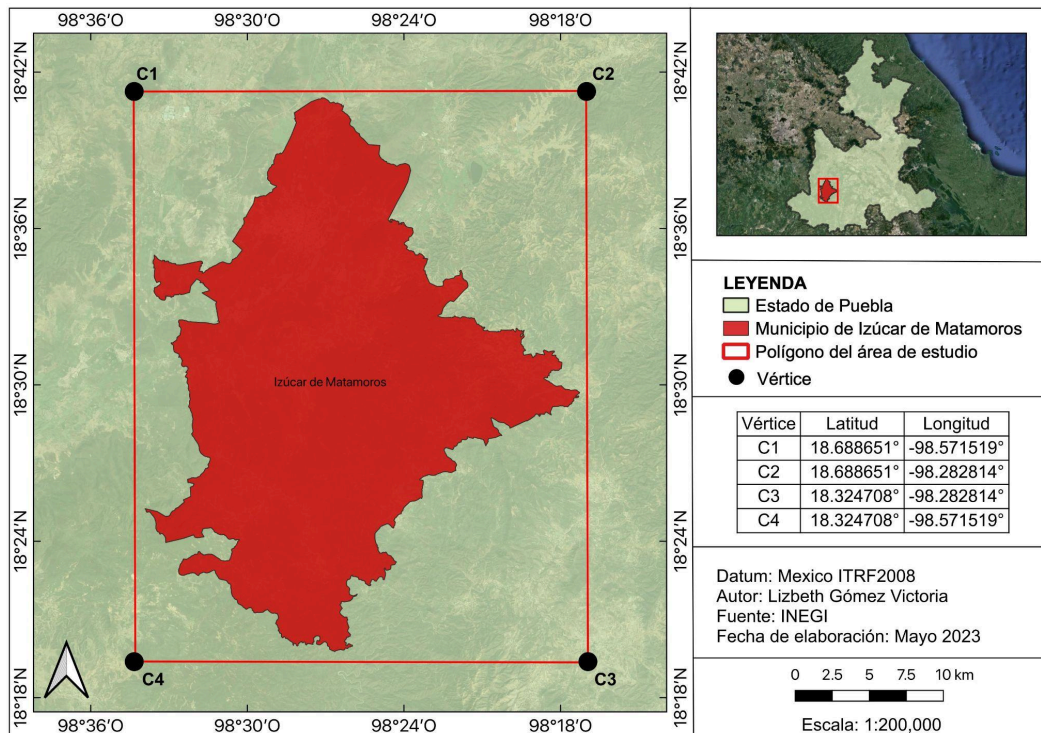
La solicitud de los datos de incendios para el área de estudio se realizó utilizando el Sistema de Información de Incendios para el Manejo de Recursos (FIRMS) disponible en el sitio web de la NASA: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/download/>.

Para crear la solicitud de descarga, fue necesario ingresar las coordenadas del área de estudio representada en el polígono de la Figura 9, así como las fechas de interés, las cuales fueron definidas tomando en cuenta la duración del periodo de cosecha de caña (mejor conocido como zafra), según datos de la Representación de Agricultura en Puebla

(2018). Estas fueron: noviembre 2018 - julio 2019, noviembre 2019 - julio 2020, noviembre 2020 - julio 2021 y noviembre 2021 - julio 2022.

Figura 9

Mapa de localización del polígono para FIRMS NASA



Fuente: Elaborado a partir de *Marco Geoestadístico*, de INEGI, 2022 (<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463770541>). Todos los derechos reservados 2022 por Licenciatario. Adaptado con permiso del autor.

La detección de incendios o focos de calor se realizó utilizando el instrumento VIIRS que se encuentra a bordo del satélite SNPP. Su resolución espacial de 375 metros garantiza una precisión superior en los datos sobre incendios. Además, su cobertura temporal desde 2012 hasta la fecha actual abarca todo el período de estudio (NASA, s.f.).

Una vez procesada la solicitud en FIRMS NASA para el satélite SNPP con el instrumento VIIRS C2, se obtuvieron un total de 164 datos de incendios. Estos datos fueron importados al programa QGIS, un Sistema de Información Geográfica (SIG) que resulta útil para

procesar y analizar información satelital. Como primer filtro de depuración se excluyeron los datos de incendios falsos positivos, tomando en cuenta únicamente los datos con un valor de confianza correspondiente a la clase 'nominal' y 'alta', ya que de acuerdo con la Tabla 6 de atributos, se consideran libres de posible contaminación por reflejos solares. Tras esta selección, se obtuvieron 111 datos de incendios válidos. Posteriormente, se conservaron únicamente los 88 datos de incendios ubicados dentro de la zona correspondiente a agricultura de riego y agricultura de temporal, ya que el cultivo de caña es viable en ambas zonas (Colpos, s.f.). Además, se verificó mediante imágenes satelitales de alta resolución del mapa base de Google Earth que los incendios estuvieran efectivamente localizados en campos de cultivo.

7.2. Desarrollo de simulaciones de dispersión y trayectoria en HYSPLIT

7.2.1. Simulaciones de trayectoria

Para determinar el desplazamiento de las masas de aire generadas por los incendios ocurridos durante la temporada de zafra, se requirió ejecutar la simulación de trayectoria de los contaminantes en el modelo HYSPLIT, disponible de forma gratuita en el sitio web de la NOAA: <https://www.ready.noaa.gov/HYSPLIT.php>.

La ejecución del modelo de trayectoria se llevó a cabo teniendo en cuenta la información del incendio con la temperatura de brillo más alta de cada periodo (noviembre 2018 - julio 2019, noviembre 2019 - julio 2020, noviembre 2020 - julio 2021 y noviembre 2021 - julio 2022), detectado por el satélite SNPP mediante el instrumento VIIRS C2. Se optó por una trayectoria de tipo ensamble, la cual ejecuta 27 trayectorias para todos los posibles desplazamientos en las dimensiones X, Y y Z, teniendo en cuenta los datos meteorológicos en la ubicación del incendio, obtenidos de GDAS, mejor conocido en español como el Sistema Global de Asimilación de Datos, proporcionado por el Servicio Meteorológico Nacional de Estados Unidos desde el año 2006, abarcando así los periodos de estudio (NOAA, 2019). Posteriormente, se introdujeron las coordenadas del incendio y se

seleccionó la opción de trayectoria hacia adelante para determinar la dirección de las masas de aire. Además, se utilizó el modelo de velocidad vertical por recomendación de la NOAA, considerando que los datos provienen directamente del modelo meteorológico. Se incluyó la fecha y la hora del incendio en UTC, en español Tiempo Coordinado Universal. Se estableció un tiempo total de duración de la trayectoria de 12 horas para evaluar el alcance de los contaminantes a lo largo del día y para analizar el comportamiento de los factores meteorológicos con el paso del tiempo. Para la altura de la trayectoria, esta se fijó en 250 metros AGL (que en español es sobre el nivel del suelo) puesto que esta es la altura mínima recomendada para este tipo de análisis, ya que HYSPLIT no considera la presencia de edificios o terreno elevado en sus cálculos de trayectoria (Luis Belalcazar, 2021, 40m01s). Todos estos detalles se resumen en la Tabla 8.

7.2.2. Simulaciones de dispersión

La dispersión de las masas de aire contaminantes se obtuvo del sitio web de la NOAA: <https://www.ready.noaa.gov/hypub-bin/disparc.pl>. Dado que no se cuenta con suficiente información sobre la fuente, se seleccionó 'Material desconocido' como parámetro de entrada, lo que resultó en la generación de un perfil de dispersión probable con una unidad de contaminante. Al igual que en el modelo de trayectoria, se utilizó la base de datos meteorológica GDAS y se optó por una dirección de dispersión hacia adelante.

Considerando que la quema de cultivo de caña se realiza a nivel del suelo, se estableció una altura superior e inferior de 0 metros. Según la literatura, la mayoría de las quemas de caña de azúcar tienen una duración menor o igual a 1 hora, por lo así se asume como parámetro de liberación. Por otra parte, se determinó una duración total de 1 y 12 horas para poder analizar cómo se comportan los factores meteorológicos a lo largo del tiempo, permitiendo así la creación de un gráfico cercano y otro más distante de la fuente de emisión. Por último, se establecieron 250 AGL como la altura superior de la capa promediada, con el fin de enfocarnos principalmente en los fenómenos cercanos a la superficie en donde está el entorno urbano. Estos datos se resumen en la Tabla 9.

Tabla 8*Parámetros para ejecutar los modelos de trayectoria en HYSPLIT*

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Modelo de trayectoria	Cálculo de trayectorias del archivo	Dirección de trayectoria	Hacia adelante
Número de ubicaciones iniciales de trayectorias	1	Movimiento vertical	Velocidad vertical del modelo
Tipo de trayectoria	Ensamble	Tiempo total de ejecución	12 horas
Meteorología	GDAS	Altura	250 AGL

Fuente: Elaborado a partir de NOAA, 2023. De dominio público.**Tabla 9***Parámetros para ejecutar los modelos de dispersión en HYSPLIT*

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Parámetro de entrada	Material desconocido	Duración de liberación	1 hora
Meteorología	GDAS	Duración total	1 y 12 horas
Dirección de trayectoria	Hacia adelante	Capa promediada	250 AGL
Altura superior e inferior	0 AGL		

Fuente: Elaborado a partir de NOAA, 2023. De dominio público.

8. Resultados

Los datos de incendios recolectados por el satélite SNPP, utilizando el instrumento VIIRS C2, están presentados en la Tabla 7 y la Figura 10. La Tabla 7 muestra la ocurrencia mensual de incendios y la cantidad acumulada durante cada periodo de cosecha; de esta tabla se destaca que el periodo 2020-2021 registró la mayor cantidad de incendios, representando el 34% del total de los datos, seguido por 2018-2019 y 2019-2020 con un 28% y 25% respectivamente. En contraste, el periodo 2021-2022 presentó la menor cantidad de incendios, siendo solo el 13% del total. Este patrón se atribuye a la contingencia sanitaria por COVID-19, que redujo el índice de migración de cortadores, provocando un aumento en la cosecha de caña de azúcar durante 2020 y 2021 (Canal 13 Puebla, 2022). También es posible que el aumento en la demanda de productos antisépticos y desinfectantes, que contienen alcohol etílico, haya sido un factor que contribuyó al incremento de incendios.

Ahora, analizando la Figura 10 se puede observar que en promedio (considerando todos los periodos) abril fue el mes con mayor cantidad de incendios (33), representando el 38% de los datos. Posteriormente, se registró una notable disminución después de este mes, lo cual se puede asociar al inicio de la temporada de lluvias y la cosecha. Esta última se lleva a cabo generalmente de junio a agosto, y el corte se realiza después de 11 a 14 meses, lo que convierte a abril en el mes de corte más productivo (Subterráneos, 2015).

Por otra parte, los datos de incendios fueron agrupados por periodo, en intervalos iguales de acuerdo a la temperatura de brillo (que no es más que temperatura captada por imágenes satelitales), utilizando la herramienta de representación graduada de QGIS. Se utilizó el modo de intervalos iguales, ya que estamos tratando con datos conocidos de temperatura (Flores-Garnica & Flores-Rodriguez, 2020).

En la Figura 11 se muestra la agrupación y distribución de los incendios sobre el mapa del municipio de Izúcar de Matamoros, donde se puede observar que gran parte de los incendios se encuentran en el área correspondiente a agricultura de riego.

Se elaboraron histogramas para estudiar la frecuencia de los incendios en relación con su temperatura de brillo, como se muestra en la Figura 12. Durante el periodo de noviembre de 2018 a julio de 2019, se recopilaron 25 datos de incendios, de los cuales 6 incendios registraron temperaturas dentro del intervalo más alto, comprendido entre 341 K y 352 K. En el periodo de noviembre de 2019 a julio de 2020, se registraron 22 datos de incendios, con solo 2 de ellos dentro del rango de temperatura de 343 K a 352 K. Para el periodo de noviembre de 2020 a julio de 2021, se recolectaron 30 datos de incendios, de los cuales 5 estuvieron en el intervalo de 344 K a 356 K. Finalmente, en el periodo de noviembre de 2021 a julio de 2022, se contabilizaron 11 datos de incendios, con solo 1 de ellos registrando una temperatura en el rango de 345 K a 349 K. A partir de esta información, se seleccionó el incendio con la temperatura más alta de cada periodo como objeto de estudio.

Tabla 7

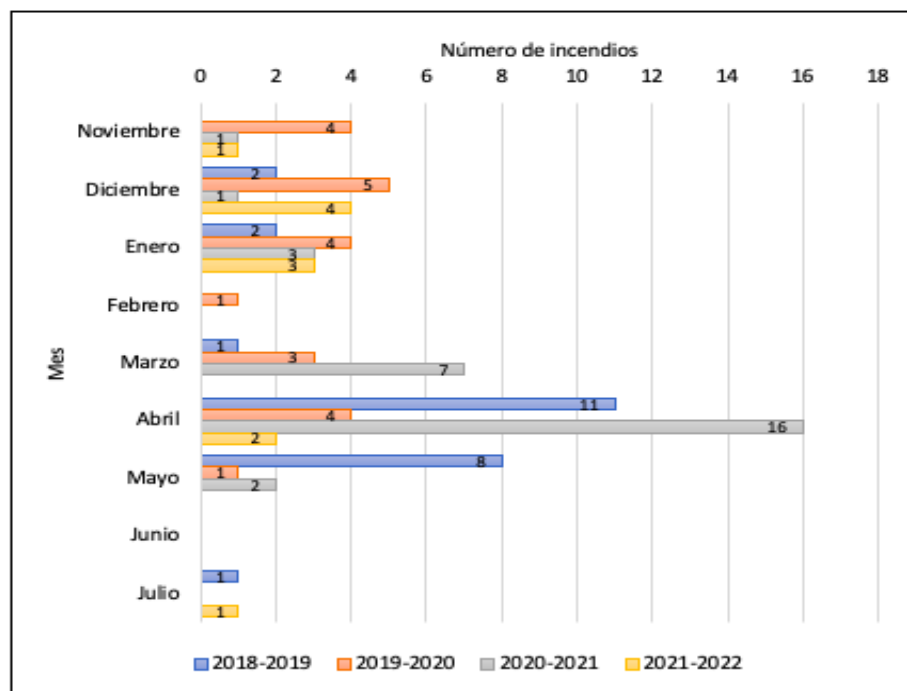
Número de incendios ocurridos por mes y periodo de zafra

Mes	2018-2019	2019-2020	2020-2021	2021-2022	Total general	Total mensual
Noviembre		4	1	1	6	7%
Diciembre	2	5	1	4	12	14%
Enero	2	4	3	3	12	14%
Febrero		1			1	1%
Marzo	1	3	7		11	13%
Abril	11	4	16	2	33	38%
Mayo	8	1	2		11	13%
Junio					0	0%
Julio	1			1	2	2%
Total general	25	22	30	11	88	100%
Total porcentual	28%	25%	34%	13%	100%	

Fuente: Elaborado a partir de FIRMS NASA, 2023. Todos los derechos reservados 2023 por Licenciatario. Adaptado con permiso del autor.

Figura 10

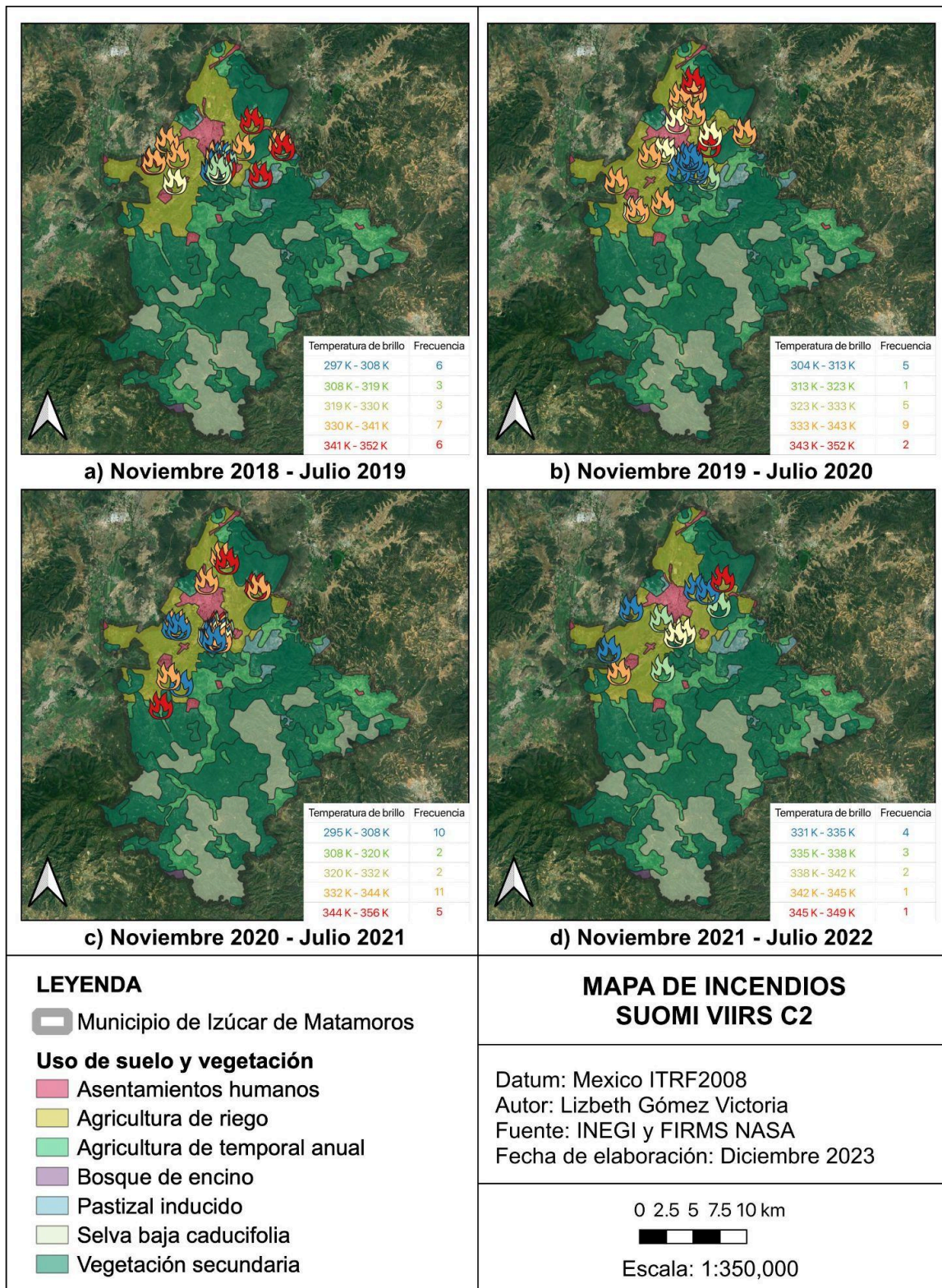
Gráfico de incendios ocurridos por mes y periodo de zafra



Fuente: Elaborado a partir de FIRMS NASA, 2023. Todos los derechos reservados 2023 por Licenciatario. Adaptado con permiso del autor.

Figura 11

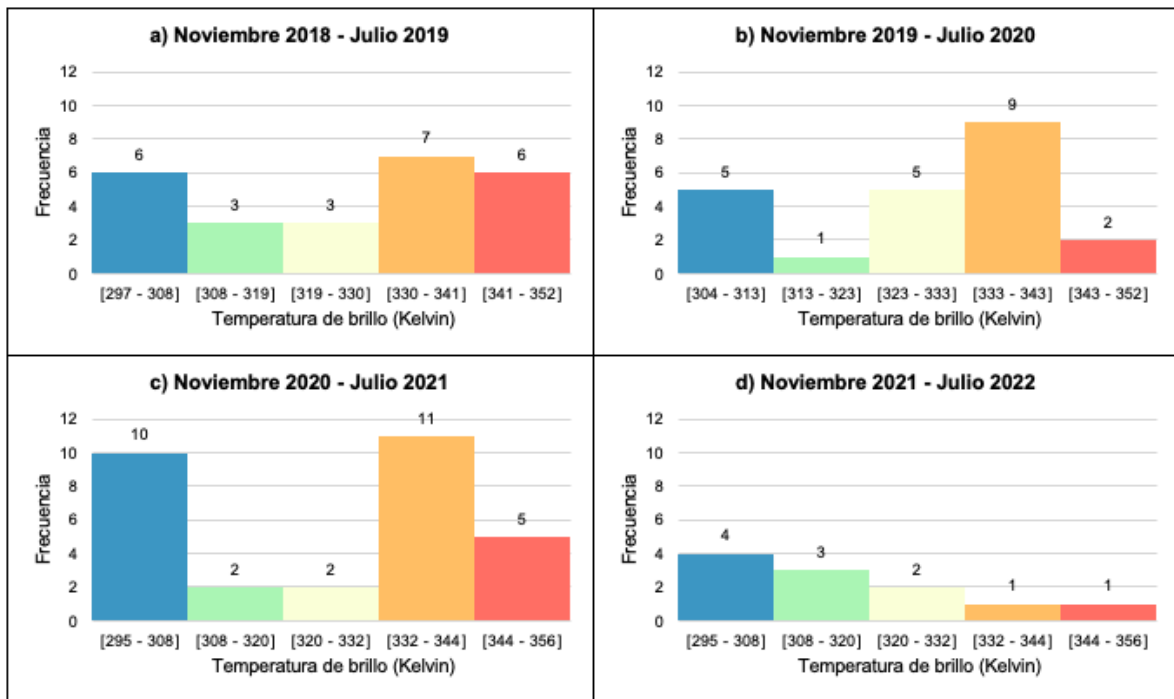
Mapa de incendios agrupados por periodo de zafra



Fuente: Elaborado a partir de INEGI (2021) y FIRMS NASA (2023). Todos los derechos reservados por Licenciatarario. Adaptado con permiso del autor.

Figura 12

Frecuencia de incendios con respecto a su temperatura de brillo



Fuente: Elaborado a partir de FIRMS NASA, 2023. Todos los derechos reservados 2023 por Licenciatario. Adaptado con permiso del autor.

8.1. Periodo noviembre 2018 a junio 2019

La Tabla 10 presenta información importante para modelar y comprender el incendio de mayor temperatura de brillo del presente periodo. Dicha información fue obtenida el 9 de abril de 2019 por el satélite SNPP a las 20:30 horas UTC, equivalente a las 14:30 horas de la Zona Centro de México, con coordenadas 18.577051, -98.516029, emitiendo una temperatura de 352.04 K y siendo este un presunto incendio de vegetación.

Tabla 10

Atributos del incendio a modelar en HYSPLIT, noviembre 2018 - junio 2019

Atributo	Información
Fecha de adquisición	9 de abril de 2019
Hora de adquisición (UTC)	20:30
Hora de adquisición Zona Centro de México (UTC-6)	14:30
Coordenadas (Latitud, Longitud)	18.577051, -98.516029
Temperatura de brillo	352.04 K
Tipo de incendio	Presunto incendio de vegetación

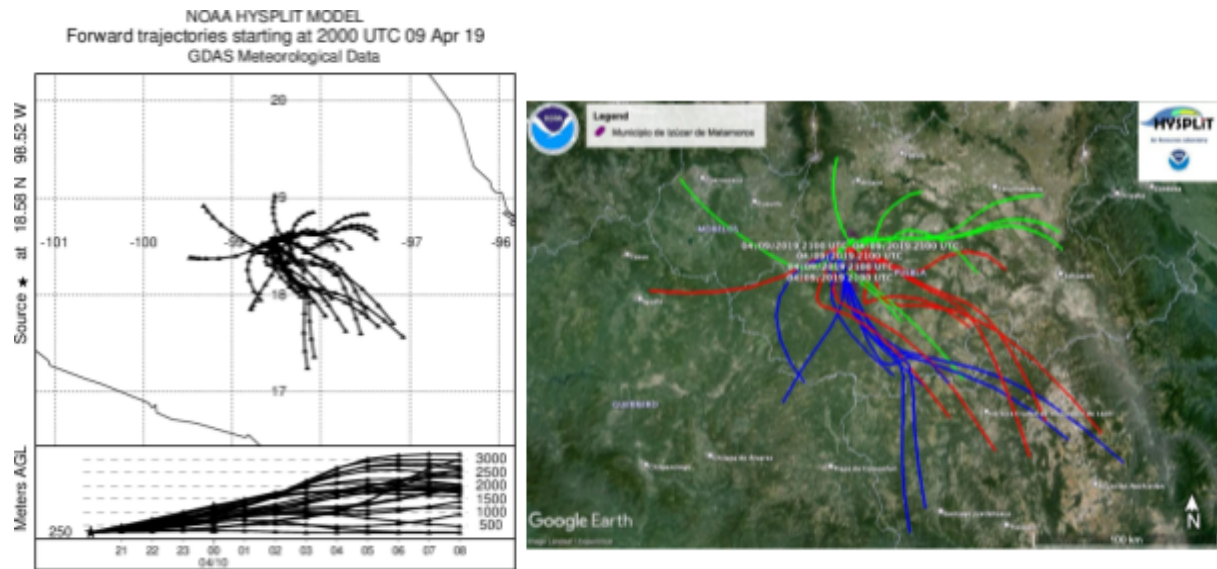
Fuente: Elaborado a partir de FIRMS NASA, 2023. Todos los derechos reservados 2023 por Licenciatarario. Adaptado con permiso del autor.

Ahora bien, analizando las trayectorias modeladas para este incendio (ver Figura 13), estas se desplazaron principalmente hacia el Norte, Noreste, Este, Sureste y Sur, saliendo del estado de Puebla para pasar por Cuernavaca, Guerrero y Oaxaca. Este día la inestabilidad de la atmósfera permitió que las masas de aire se ubicaran a distancias de hasta 132 km a partir del punto de emisión. También aportó a su distribución a diferentes niveles de altura, las cuales llegaron a situarse entre los 500 y 3000 metros sobre el nivel del suelo. Durante las 12 horas de duración, estas altitudes relativamente bajas podrían haber favorecido la deposición de los contaminantes, resultando en un aumento de la

concentración de contaminantes en áreas cercanas a las fuente de emisión. Por otro lado, aquellos contaminantes que se encuentran a alturas mayores pudieron haber sido transportados considerablemente lejos antes de dispersarse o depositarse en la superficie.

Figura 13

Modelación de trayectorias en HYSPLIT para el incendio ocurrido el 9 de abril de 2019



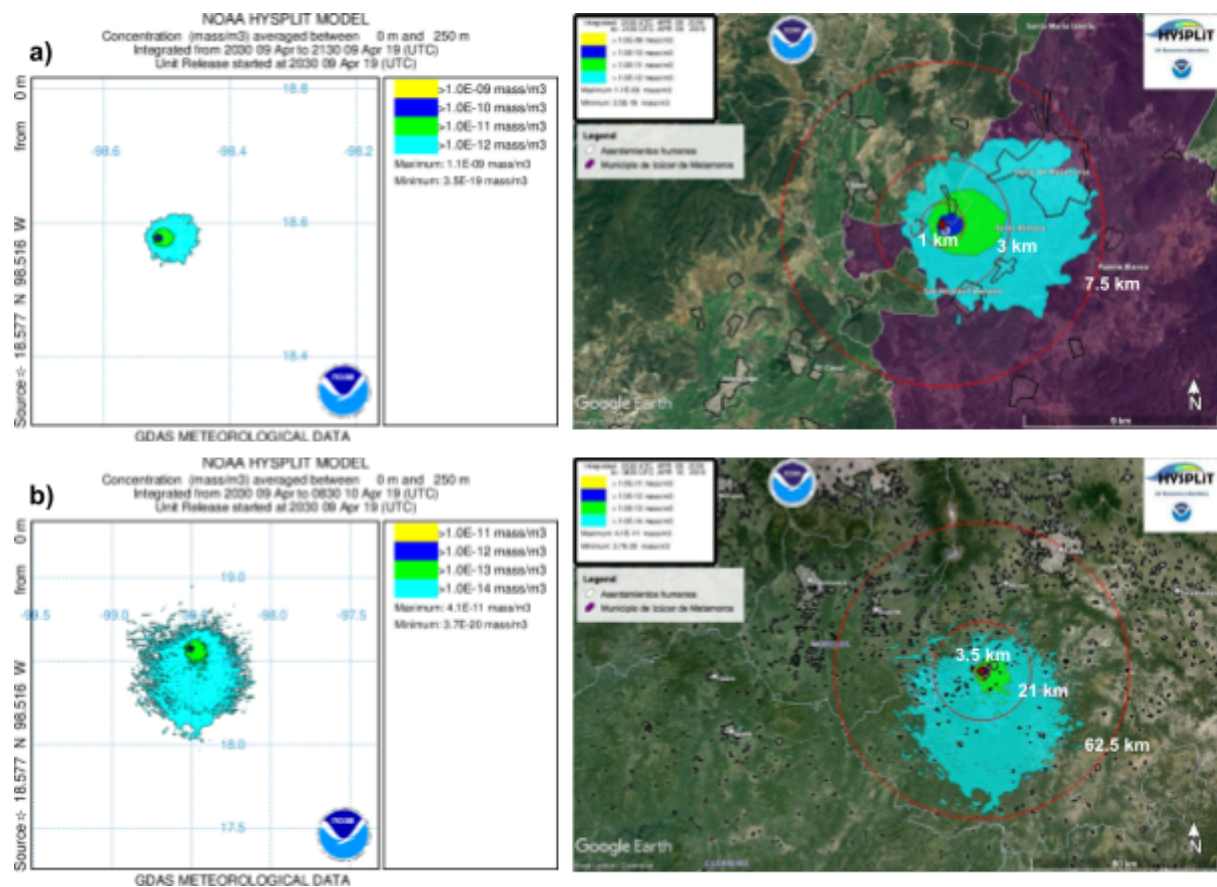
Fuente: En la izquierda la simulación en HYSPLIT y a la derecha su representación en Google Earth, por NOAA, 2024. De dominio público.

En la Figura 14a se observa el primer ejercicio de modelación de la dispersión de contaminantes originados por el incendio, comprendido de las 20:30 a las 21:30 UTC (14:30 a las 15:30 Zona Centro de México). Durante esta primera hora, las emisiones del incendio tuvieron influencia únicamente sobre el municipio de Izúcar de Matamoros; en Google Earth podemos visualizar que la pluma contaminante se extendió 7.5 km hacia el Este, abarcando las localidades de Casa Blanca, Santa Bárbara, Matzaco y San Nicolás Tolentino. Es importante mencionar que la pluma se dispersó hacia los asentamientos humanos del municipio, los cuales recibieron concentraciones menores de los contaminantes emitidos con valores de: $1 \times 10^{-11} \text{ masa}/\text{m}^3$ para la región de color verde, que abarcó una superficie de 3.7 km^2 y $1 \times 10^{-12} \text{ masa}/\text{m}^3$ para la región color celeste, que abarcó un área de

53.4 km². Por otro lado, la Figura 14b representa una modelación con una duración de 12 horas, comprendida de las 20:30 a las 08:30 UTC (14:30 a las 2:30 Zona Centro de México). En esta ocasión la pluma contaminante cambió ligeramente de dirección, extendiéndose hacia el Sur a 62.5 km a la redonda. En este ejercicio los asentamientos humanos del municipio recibieron las masas contaminantes bajo la misma concentración (1×10^{-11} masa/m³), y es posible observar cómo en un transcurso de 12 horas la dispersión se extendió hacia otros sitios llegando a tener ahora influencia sobre 20 municipios del estado de Puebla y 1 municipio de Morelos. Esto se traduce a un total de 266,378 personas que potencialmente pudieron estar expuestas a estos contaminantes (ver Tabla 11).

Figura 14

Modelación en HYSPLIT de la dispersión de contaminantes, 9 de abril de 2019



Fuente: (a) Dispersión de contaminantes transcurrida 1 hora y (b) Dispersión de contaminantes transcurridas 12 horas, por NOAA, 2024. De dominio público.

Tabla 11

Estados, municipios y población potencialmente expuesta por el incendio ocurrido el 9 de abril de 2019

Estado	Clave	Municipio	Clave	Población total
Morelos	17	Axochiapan	3	39,174
Puebla	21	Ahuatlán	7	3,162
Puebla	21	Atzala	21	1,512
Puebla	21	Axutla	24	976
Puebla	21	Cuayuca de Andrade	42	3,315
Puebla	21	Chiautla	47	21,699
Puebla	21	Chietla	51	37,030
Puebla	21	Chila de la Sal	56	1,317
Puebla	21	Chinantla	59	2,846
Puebla	21	Epatlán	62	4,943
Puebla	21	Huehuetlán el Chico	73	9,760
Puebla	21	Izúcar de Matamoros	85	82,809
Puebla	21	San Martín Totoltepec	133	692
Puebla	21	Tehuizingo	157	12,672
Puebla	21	Tepeojuma	166	8,918
Puebla	21	Tepexco	168	7,523
Puebla	21	Tilapa	176	9,664
Puebla	21	Tlapanalá	185	10,344
Puebla	21	Xochiltepec	201	3,375
Puebla	21	Zacapala	206	4,647
Total municipios:		20	Total población expuesta:	266,378

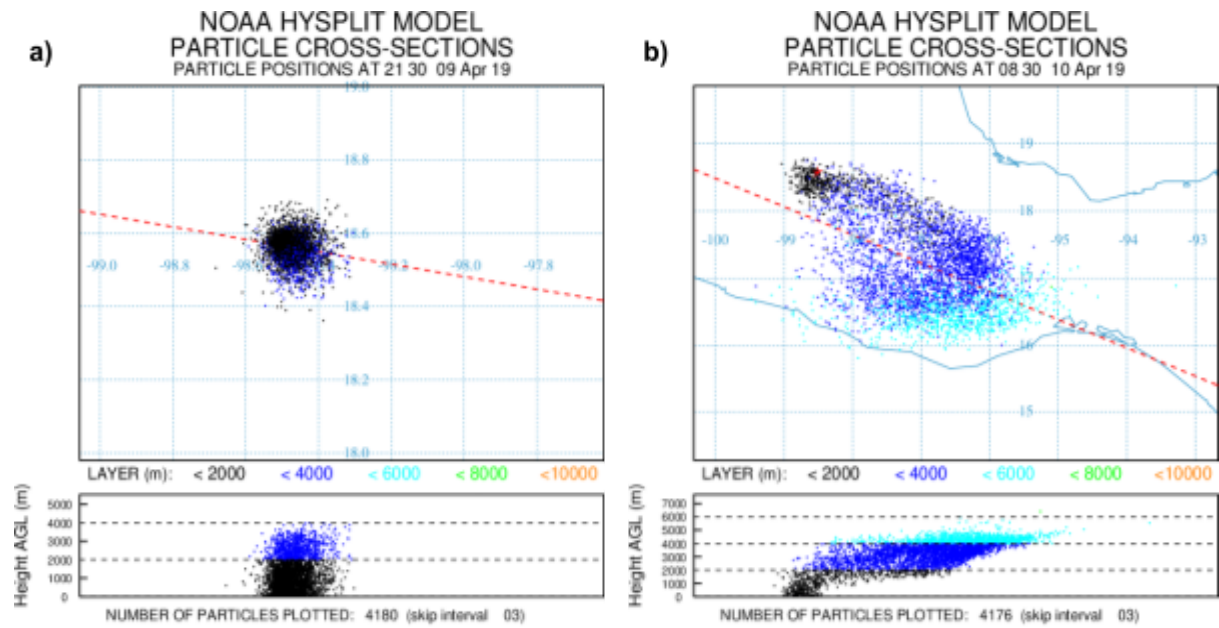
Fuente: Elaborado a partir de *Marco Geoestadístico*, de INEGI, 2022 (<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463770541>) y Censo de Población y Vivienda 2020, de INEGI, 2020 (<https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#microdatos>). Todos los derechos reservados por Licenciario. Adaptado con permiso del autor.

Asimismo, HYSPLIT nos muestra la posición de las partículas contaminantes a diferentes alturas. La Figura 15a muestra que a las 21:30 UTC (15:30 Zona Centro de México) las partículas lograron ascender hasta los 4000 metros sobre el nivel del suelo, mientras que para la simulación de 12 horas se observa que a las 8:30 UTC (2:30 Zona Centro de México) del 10 de abril de 2019, las partículas alcanzaron los 6000 metros de altura, y la mayor cantidad de partículas se situó entre los 2000 y 4000 metros.

Aquí podemos analizar cómo los factores meteorológicos influyen en el transporte de contaminantes y el área afectada. En el primer caso, las partículas no se dispersaron significativamente, ni en altura ni de forma horizontal, lo que resultó en que la concentración de partículas permaneciera muy cerca de la fuente de emisión. Por otro lado, en el segundo caso, se observa cómo las partículas comienzan a dispersarse, alejándose cada vez más del punto inicial. Como se mencionó anteriormente, en la modelación de 12 horas la mayor cantidad de las partículas se ubicó entre los 2000 y 4000 metros sobre el nivel del suelo, lo que resultó en disminución de la cantidad de partículas en la CLP y, por ende, en una reducción de la contaminación en áreas locales. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la dispersión de contaminantes más allá de la CLP puede afectar a otras regiones e incluso a otros países, ya que al elevarse a mayores alturas pueden ser transportados a distancias mayores, como se muestra en la Figura 15b, en donde se observa el recorrido ya alcanzado por estas partículas.

Figura 15

Modelación en HYSPLIT de la dispersión de partículas, 9 de abril de 2019



Fuente: (a) Dispersión de partículas transcurrida 1 hora y (b) Dispersión de partículas transcurridas 12 horas, por NOAA, 2024. De dominio público.

8.2. Periodo noviembre 2019 a junio 2020

En este segundo periodo, el incendio con mayor temperatura de brillo ocurrió el 26 de diciembre de 2019 (Tabla 12). Gracias al satélite SNPP, sabemos que fue adquirido a las 20:36 horas UTC (14:36 para la Zona Centro de México); las coordenadas de su ubicación fueron: 18.592516, -98.436752; su temperatura de brillo fue de 352.35 K, por último fue clasificado como presunto incendio de vegetación.

Tabla 12

Atributos del incendio a modelar en HYSPLIT, noviembre 2019 - junio 2020

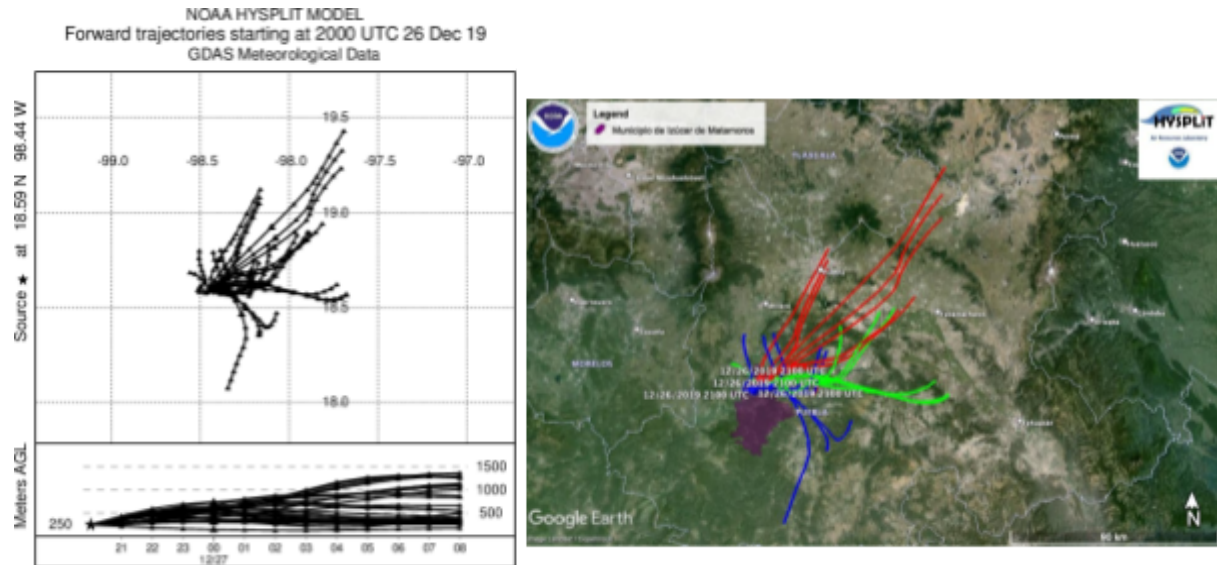
Atributo	Información
Fecha de adquisición	26 de diciembre de 2019
Hora de adquisición (UTC)	20:36
Hora de adquisición zona centro de México (UTC-6)	14:36
Coordenadas (Latitud, Longitud)	18.592516, -98.436752
Temperatura de brillo	352.35 K
Tipo de incendio	Presunto incendio de vegetación

Fuente: Elaborado a partir de FIRMS NASA, 2023. De dominio público.

Las trayectorias del viento para el incendio representado en la Figura 16, siguieron las direcciones Noreste, Este, Sureste y Sur, llegando a recorrer hasta 122 km, y quedando en su mayoría dentro del Estado de Puebla. En esta ocasión las masas de aire no fueron elevadas en cuanto a altura, pues se ubicaron en todo momento dentro de la capa límite planetaria, lo que pudo contribuir a la permanencia de niveles de contaminación elevados durante las 12 horas conocidas de la modelación.

Figura 16

Modelación de trayectorias en HYSPLIT para el incendio ocurrido el 26 de diciembre de 2019



Fuente: En la izquierda la simulación en HYSPLIT y a la derecha su representación en Google Earth, por NOAA, 2024. De dominio público.

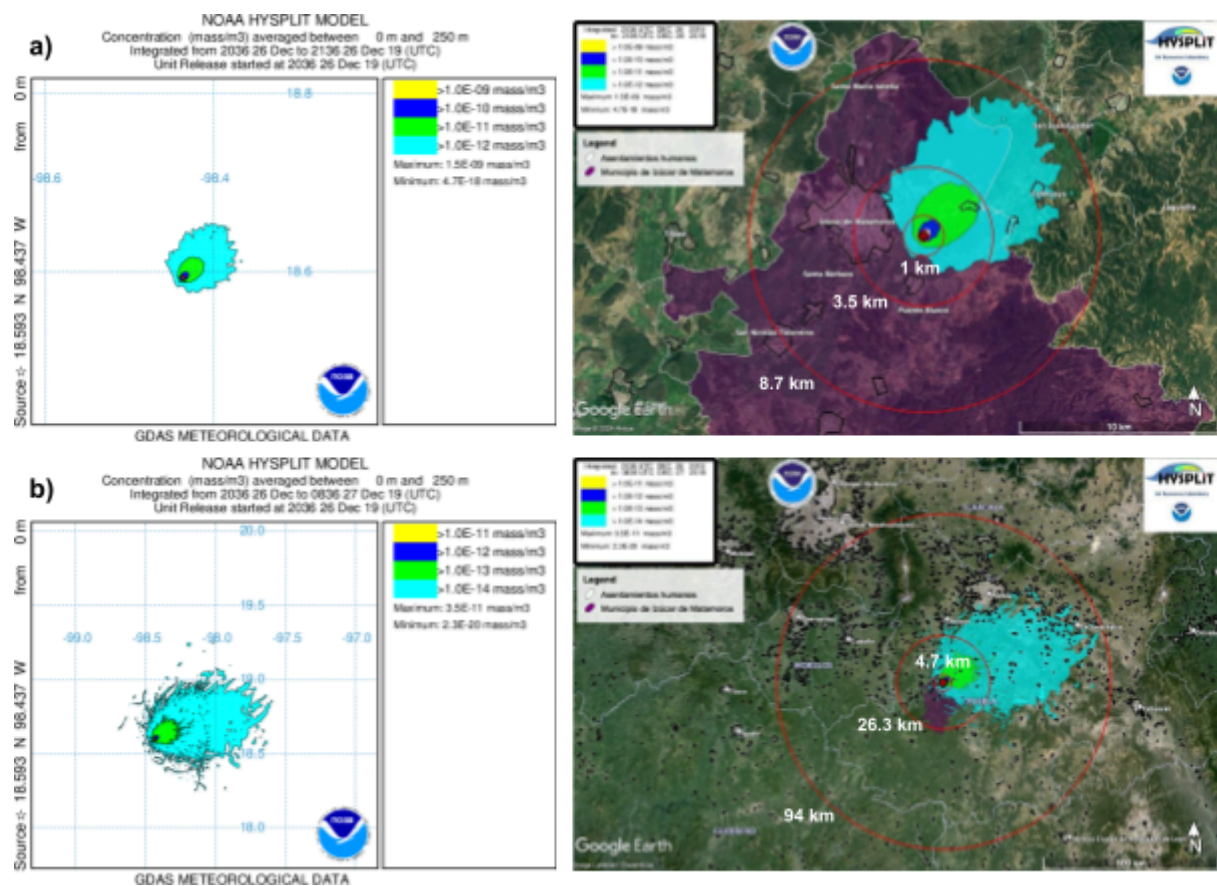
La Figura 17a muestra la modelación de 1 hora de dispersión de las emisiones del incendio comprendido de las 20:36 a las 21:36 UTC (14:36 a las 15:36 Zona Centro de México). Este día las emisiones se alejaron 8.7 km (hacia el Noreste) de la zona urbana del municipio. Sin embargo, dichas emisiones tuvieron influencia sobre asentamientos humanos de menor tamaño San José las Bocas de Izúcar de Matamoros, así como las localidades de Las Tres Cruces, Emiliano Zapata, San Mateo Oxtotla, San Miguel Pedregal y Santa Ana Necoxtla del municipio de Epatlán. Los cuales recibieron las concentraciones mínimas de los contaminantes emitidos durante la primera hora y cuyos valores fueron de $1 \times 10^{-12} \text{ masa/m}^3$ para la región de color celeste, que abarcó una superficie de 51.2 km^2 y $1 \times 10^{-11} \text{ masa/m}^3$ para la región color verde, que abarcó un área de 7.71 km^2 .

Ahora bien, en la Figura 17b se puede visualizar cómo se comportaron los factores meteorológicos transcurridas 12 horas, de las 20:36 a las 8:36 UTC (14:36 a las 2:36 Zona

Centro de México). En este ejercicio la pluma contaminante cambió ligeramente de dirección, extendiéndose hacia el Este en un radio de 94 km. Esta ocasión las condiciones atmosféricas, permitieron que la contaminación no tuviera gran extensión, quedando únicamente dentro del estado de Puebla. A pesar de ello, las masas contaminantes comenzaron a entrar a la ciudad de Puebla bajo la concentración $1 \times 10^{-14} \text{ masa/m}^3$. En general, las emisiones tuvieron influencia sobre los asentamientos humanos de 44 municipios del estado de Puebla, y un total de 2,620,389 de personas expuestas. Esta cifra fue mucho mayor que el periodo anterior, debido a que dispersión se extiende hacia áreas con mayor densidad poblacional.

Figura 17

Modelación en HYSPLIT de la dispersión de contaminantes, 26 de diciembre de 2019



Fuente: (a) Dispersión de contaminantes transcurrida 1 hora y (b) Dispersión de contaminantes transcurridas 12 horas, por NOAA, 2024. De dominio público.

Tabla 13

Estados, municipios y población potencialmente expuesta por el incendio ocurrido el 26 de diciembre de 2019

Estado	Clave	Municipio	Clave	Población total
Puebla	21	Acajete	1	72,894
Puebla	21	Ahuatlán	7	3,162
Puebla	21	Amozoc	15	125,876
Puebla	21	Atlixco	19	141,793
Puebla	21	Atoyatempan	20	7,704
Puebla	21	Coatzingo	31	2,820
Puebla	21	Cuapiaxtla de Madero	38	10,542
Puebla	21	Cuautinchán	40	12,340
Puebla	21	Cuayuca de Andrade	42	3,315
Puebla	21	Chigmecatitlán	52	1,215
Puebla	21	Epatlán	62	4,943
Puebla	21	Huatlatlauca	70	6,111
Puebla	21	Huitziltepec	79	5,782
Puebla	21	Ixcaquixtla	82	8,804
Puebla	21	Izúcar de Matamoros	85	82,809
Puebla	21	La Magdalena Tlatlauquitepec	95	650
Puebla	21	Mixtla	97	2,668
Puebla	21	Molcaxac	98	6,668
Puebla	21	Ocoyucan	106	42,669
Puebla	21	Puebla	114	1,692,181
Puebla	21	Los Reyes de Juárez	118	30,021
Puebla	21	San Diego la Mesa Tochimiltzingo	121	1,270
Puebla	21	San Gregorio Atzompa	125	9,671
Puebla	21	San Juan Atzompa	131	975
Puebla	21	San Martín Totoltepec	133	692
Puebla	21	San Salvador Huixcolotla	144	16,790
Puebla	21	Santa Catarina Tlaltempan	146	749
Puebla	21	Santa Inés Ahuatempan	147	6,341
Puebla	21	Huehuetlán el Grande	150	6,105

Estado	Clave	Municipio	Clave	Población total
Puebla	21	Santo Tomás Hueyotlipan	151	9,315
Puebla	21	Tecali de Herrera	153	23,625
Puebla	21	Tecamachalco	154	80,771
Puebla	21	Teopantlán	159	3,836
Puebla	21	Tepeaca	164	84,270
Puebla	21	Tepeojuma	166	8,918
Puebla	21	Tepexi de Rodríguez	169	22,331
Puebla	21	Tepeyahualco de Cuauhtémoc	171	3,851
Puebla	21	Tlanepantla	182	5,390
Puebla	21	Tochtepec	189	22,454
Puebla	21	Tzicatlacoyan	193	6,476
Puebla	21	Xochiltepec	201	3,375
Puebla	21	Xochitlán Todos Santos	203	7,178
Puebla	21	Yehualtepec	205	26,392
Puebla	21	Zacapala	206	4,647
Total municipios:		44	Total población expuesta:	2,620,389

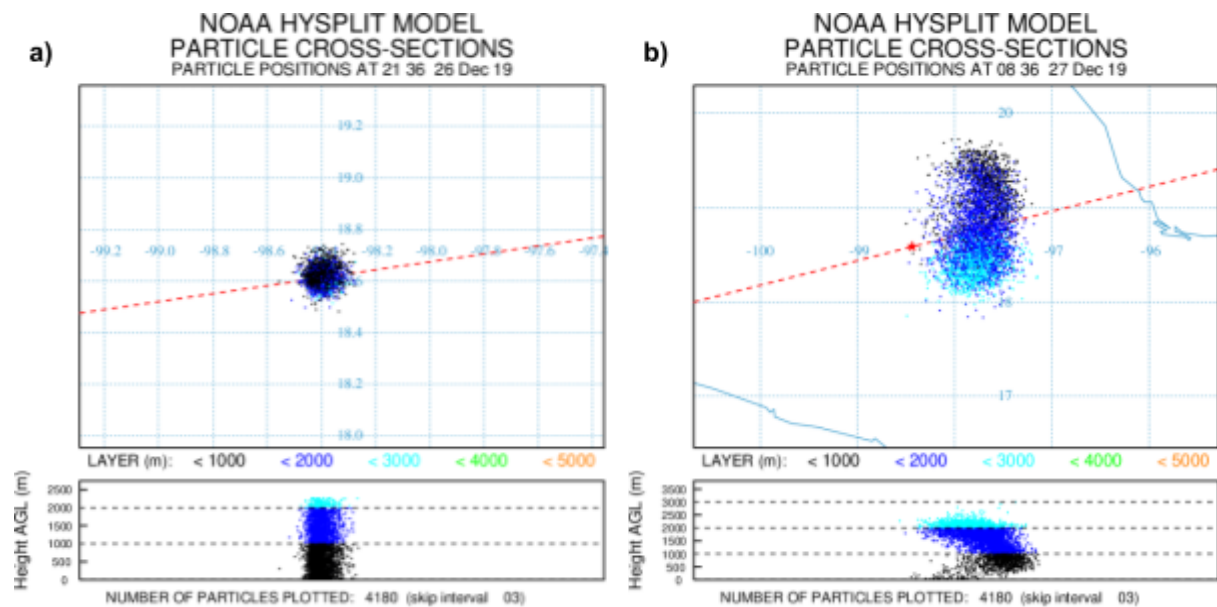
Fuente: Elaborado a partir de *Marco Geoestadístico*, de INEGI, 2022 (<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463770541>) y Censo de Población y Vivienda 2020, de INEGI, 2020 (<https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/#microdatos>). Todos los derechos reservados por Licenciario. Adaptado con permiso del autor.

Con respecto a la distribución de las partículas, los datos obtenidos a través de HYSPLIT indican que estas no alcanzaron altitudes significativas (como también se observó en las trayectorias). A las 21:36 UTC (15:36 Zona Centro de México), se registró un ascenso hasta los 2000 metros sobre el nivel del suelo (ver Figura 18a), mientras que a las 8:36 UTC (2:36 Zona Centro de México) del 27 de diciembre de 2019, el aumento fue de apenas 500 metros, alcanzando los 2500 metros de altura (ver Figura 18b). Además, por la ubicación de las partículas podemos interpretar que el viento fue débil ese día, limitando así su dispersión

horizontal; se observa que el conglomerado de partículas apenas se desplazó considerablemente. Otra cosa importante que hay que destacar es que la mayor concentración de partículas se mantuvo dentro de la CLP, indicando una posible baja calidad del aire local, ya que las partículas no se dispersaron ni vertical ni horizontalmente.

Figura 18

Modelación en HYSPLIT de la dispersión de partículas, 26 de diciembre de 2019



Fuente: (a) Dispersión de partículas transcurrida 1 hora y (b) Dispersión de partículas transcurridas 12 horas, por NOAA, 2024. De dominio público.

8.3. Periodo noviembre 2020 a junio 2021

Durante este período, el incendio con la temperatura de brillo más alta se registró el 5 de mayo de 2021. Gracias a la información proporcionada por el satélite Suomi NPP, tenemos conocimiento de que la adquisición de datos tuvo lugar a las 18:54 horas UTC (12:54 Zona Centro de México), con las coordenadas de ubicación registradas en 18.613863, -98.424362. La temperatura de brillo medida fue de 356.13 K, y el incendio fue clasificado como presunto incendio de vegetación (ver Tabla 14).

Tabla 14

Atributos del incendio a modelar en HYSPLIT, noviembre 2020 - junio 2021

Atributo	Información
Fecha de adquisición	5 de mayo de 2021
Hora de adquisición (UTC)	18:54
Hora de adquisición zona centro de México (UTC-6)	12:54
Coordenadas (Latitud, Longitud)	18.613863, -98.424362
Temperatura de brillo	356.13 K
Tipo de incendio	Presunto incendio de vegetación

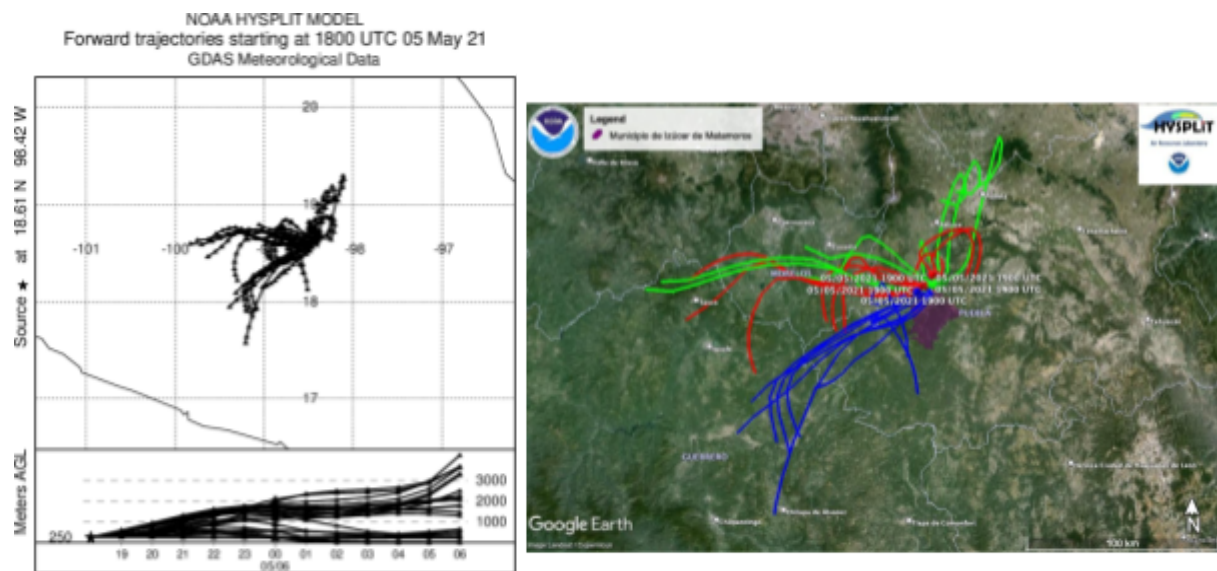
Fuente: Elaborado a partir de FIRMS NASA, 2023. De dominio público.

Las trayectorias del viento durante el incendio, tal como se muestra en la Figura 19, siguieron principalmente direcciones del Noreste, Sur, Suroeste y Oeste, llegando a alcanzar distancias de hasta 138 km. En esta ocasión, los vientos ejercieron influencia sobre los estados de Morelos, Guerrero y Tlaxcala, además de Puebla, por supuesto. Durante ese día, la atmósfera mostró una notable inestabilidad, con masas de aire distribuidas en capas próximas al nivel del suelo y, en algunos casos, superando la CLP, alcanzando altitudes superiores a los 3000 metros. Ya que una fracción considerable de las trayectorias quedó por debajo de los 1000 metros de altura, podemos decir que esto pudo

haber contribuido al aumento de los niveles de contaminación durante las 12 horas de modelación. Además, en las rutas dirigidas hacia el Noreste, se observó una recirculación de contaminantes. Por ejemplo, al llegar a la capital de Puebla, se evidenció claramente este fenómeno, posiblemente impulsado por la topografía y la presencia de edificaciones en el área urbana. La recirculación mencionada podría haber sido otro factor contribuyente a la acumulación de contaminantes y a una reducción en la calidad del aire en las zonas urbanas circundantes.

Figura 19

Modelación de trayectorias en HYSPLIT para el incendio ocurrido el 5 de mayo de 2021



Fuente: En la izquierda la simulación en HYSPLIT y a la derecha su representación en Google Earth, por NOAA, 2024. De dominio público.

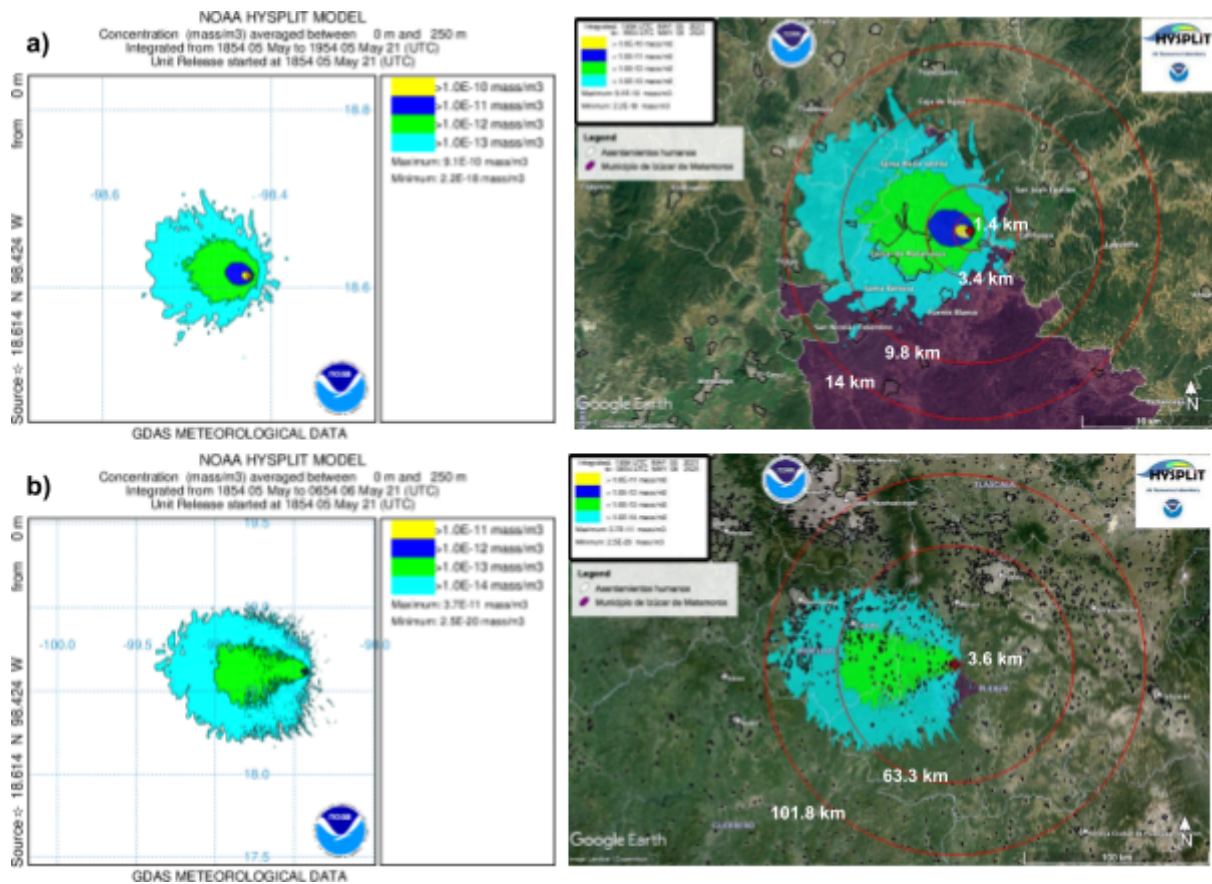
La Figura 20a representa la modelación de la dispersión de las emisiones del incendio durante un período de 1 hora, desde las 18:54 hasta las 19:54 UTC (12:54 a las 13:54 Zona Centro de México). En este análisis, las emisiones se propagaron 14 km hacia el Oeste, dirigiéndose hacia la zona urbana del municipio. En el centro del municipio se registraron concentraciones de $1 \times 10^{-12} \text{ masa/m}^3$, que se extendieron en un radio de 9.8

km, cubriendo un área de 170 km^2 (representada en verde). Por otro lado, localidades más pequeñas dentro del municipio de Izúcar, como San Nicolás Tolentino, Puente Blanco, Santa Bárbara, San José las Bocas, Santa María Tatetla y La Galarza, recibieron masas contaminantes con concentraciones más bajas de $1 \times 10^{-13} \text{ masa/m}^3$, cubriendo un área de 51.3 km^2 (señalada en celeste). Además, otras áreas afectadas incluyeron el municipio de Tilapa, con impacto en las localidades de Agua Dulce y Casa Blanca, así como la localidad de Chalma, afectando al municipio de Tlapanalá.

En la Figura 20b, se presenta el comportamiento de los factores meteorológicos transcurridas 12 horas, desde las 18:54 hasta las 6:54 UTC (18:54 a las 0:54 Zona Centro de México). En este análisis, se observa que la pluma contaminante continuó su trayectoria hacia el Oeste, alcanzando una extensión de 101.8 km después de las 12 horas de modelación. Mediante el uso del mapa de Google Earth, se puede apreciar cómo los contaminantes ejercieron influencia en prácticamente todo el Estado de Morelos, llegando incluso hasta la capital, Cuernavaca, con concentraciones más bajas, siendo de $1 \times 10^{-14} \text{ masa/m}^3$ y cubriendo un área de $6,391 \text{ km}^2$ (representada de color celeste). Por otra parte, las masas contaminantes con una concentración más alta ($1 \times 10^{-13} \text{ masa/m}^3$), abarcaron un área de $1,626 \text{ km}^2$ (representada en color verde). En términos generales, se constata que los contaminantes impactaron en 19 municipios del estado de Puebla, 29 de Morelos, 3 de México y solo 1 de Guerrero, teniendo un total de 1,898,578 de población expuesta (ver Tabla 15).

Figura 20

Modelación en HYSPLIT de la dispersión de contaminantes, 5 de mayo de 2021



Fuente: (a) Dispersión de contaminantes transcurrida 1 hora y (b) Dispersión de contaminantes transcurridas 12 horas, por NOAA, 2024. De dominio público.

Tabla 15

Estados, municipios y población potencialmente expuesta por el incendio ocurrido el 5 de mayo de 2021

Estado	Clave	Municipio	Clave	Población total
Guerrero	12	Huitzuco de los Figueroa	34	36,593
México	15	Atlautla	15	31,900
México	15	Ecatzingo	34	10,827
México	15	Ozumba	68	30,785
Morelos	17	Atlatlahucan	2	25,232
Morelos	17	Axochiapan	3	39,174

Estado	Clave	Municipio	Clave	Población total
Morelos	17	Ayala	4	89,834
Morelos	17	Cuautla	6	187,118
Morelos	17	Emiliano Zapata	8	107,053
Morelos	17	Jantetelco	10	18,402
Morelos	17	Jiutepec	11	215,357
Morelos	17	Jojutla	12	57,682
Morelos	17	Jonacatepec de Leandro Valle	13	16,694
Morelos	17	Mazatepec	14	9,653
Morelos	17	Ocuituco	16	19,219
Morelos	17	Puente de Ixtla	17	40,018
Morelos	17	Temixco	18	122,263
Morelos	17	Tepalcingo	19	28,122
Morelos	17	Tepoztlán	20	54,987
Morelos	17	Tetela del Volcán	22	14,853
Morelos	17	Tlaltizapán de Zapata	24	52,399
Morelos	17	Tlaquiltenango	25	33,789
Morelos	17	Tlayacapan	26	19,408
Morelos	17	Totolapan	27	12,750
Morelos	17	Xochitepec	28	73,539
Morelos	17	Yautepec	29	105,780
Morelos	17	Yecapixtla	30	56,083
Morelos	17	Zacatepec	31	36,094
Morelos	17	Zacualpan de Amilpas	32	9,965
Morelos	17	Temoac	33	16,574
Morelos	17	Coatetelco	34	11,347
Morelos	17	Xoxocotla	35	27,805
Morelos	17	Hueyapan	36	7,855
Puebla	21	Acteopan	5	3,070
Puebla	21	Atzala	21	1,512
Puebla	21	Atzitzihuacán	22	12,857
Puebla	21	Cohetzala	32	1,382
Puebla	21	Cohuecan	33	5,403
Puebla	21	Chiautla	47	21,699
Puebla	21	Chietla	51	37,030

Estado	Clave	Municipio	Clave	Población total
Puebla	21	Huaquechula	69	29,233
Puebla	21	Huehuetlán el Chico	73	9,760
Puebla	21	Izúcar de Matamoros	85	82,809
Puebla	21	Jolalpan	87	13,308
Puebla	21	San Martín Totoltepec	133	692
Puebla	21	Teotlalco	160	3,689
Puebla	21	Tepemaxalco	165	1,216
Puebla	21	Tepeojuma	166	8,918
Puebla	21	Tepexco	168	7,523
Puebla	21	Tilapa	176	9,664
Puebla	21	Tlapanalá	185	10,344
Puebla	21	Tochimilco	188	19,315
Total municipios:		52	Total población expuesta:	1,898,578

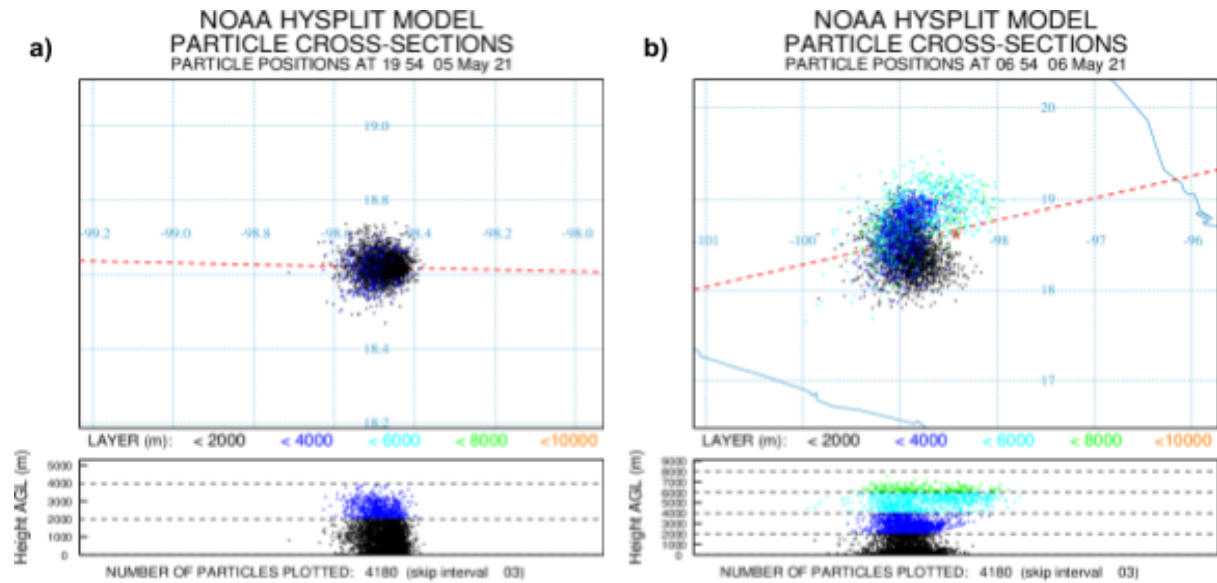
Fuente: Elaborado a partir de *Marco Geoestadístico*, de INEGI, 2022 (<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463770541>). Todos los derechos reservados 2022 por Licenciatario. Adaptado con permiso del autor.

En cuanto a la distribución de las partículas, las simulaciones recopiladas mediante HYSPLIT muestran que estas alcanzaron altitudes significativas. A las 19:54 UTC (3:54 Zona Centro de México), se detectó un ascenso hasta los 4000 metros sobre el nivel del suelo (consulte la Figura 21a), mientras que a las 6:54 UTC (0:54 Zona Centro de México) del 6 de mayo de 2021, la altitud aumentó hasta los 7000 metros (consulte la Figura 21b). Durante este día, se observó un desplazamiento del conglomerado de partículas, más en la parte vertical que en la parte horizontal. Sin embargo, una parte sustancial de las mismas quedó confinada en la CLP, avanzando gradualmente. Esto significa que esta fracción de las partículas contaminantes que quedaron acumuladas pudo resultar en niveles más altos de contaminación en las áreas urbanas y suburbanas anteriormente mencionadas, ya que retomando la Figura 19 podemos observar que a partir de las 00:00 UTC (18:00 Zona

Centro de México) la inversión térmica es muy notable. Debido a la hora las temperaturas en la superficie comenzaron a bajar y los vientos a debilitarse, ocasionando poca dispersión de los contaminantes.

Figura 21

Modelación en HYSPLIT de la dispersión de contaminantes, 5 de mayo de 2021



Fuente: (a) Dispersión de partículas transcurrida 1 hora y (b) Dispersión de partículas transcurridas 12 horas, por NOAA, 2024. De dominio público.

8.4. Periodo noviembre 2021 a junio 2022

Durante el último período de estudio, el incendio más intenso tuvo lugar el 26 de julio de 2022. Gracias al satélite SNPP, se pudo determinar que el evento fue registrado a las 20:06 horas UTC (14:06 en la Zona Centro de México). Las coordenadas de su ubicación fueron 18.620232, -98.424637, y su temperatura de brillo alcanzó los 348.51 K. Finalmente, el incendio fue clasificado como un presunto incendio de vegetación.

Tabla 16

Atributos del incendio a modelar en HYSPLIT, noviembre 2021 - junio 2022

Atributo	Información
Fecha de adquisición	26 de julio de 2022
Hora de adquisición (UTC)	20:06
Hora de adquisición zona centro de México (UTC-6)	14:06
Coordenadas (Latitud, Longitud)	18.620232, -98.424637
Temperatura de brillo	348.51 K
Tipo de incendio	Presunto incendio de vegetación

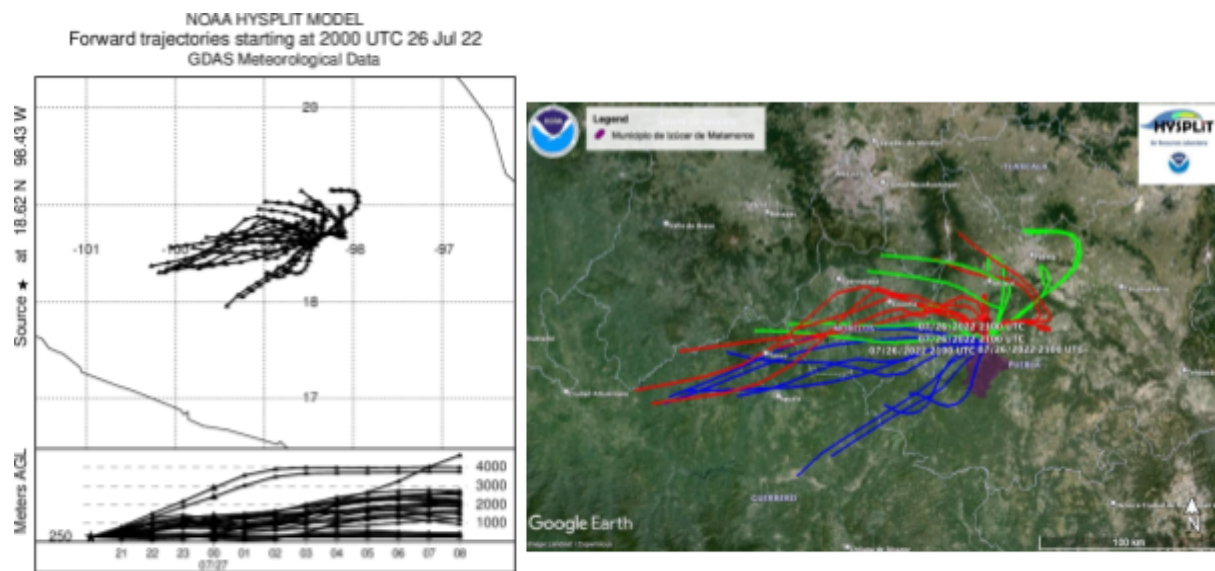
Fuente: Elaborado a partir de FIRMS NASA, 2023. De dominio público.

Durante el incidente del incendio, el patrón de los vientos, como se representa en la Figura 22, mayormente siguieron las direcciones Suroeste y Oeste, alcanzando distancias de hasta 200 km y ejerciendo su influencia sobre los estados de Morelos y Guerrero, además de incidir en Puebla. La atmósfera también mostró una notoria inestabilidad ese día, con masas de aire distribuidas en capas cercanas al suelo y, en algunos casos, sobrepasando la CLP, alcanzando altitudes superiores a los 4000 metros. Ya que la mayoría de las trayectorias quedaron atrapadas cerca del suelo, se puede deducir que este fenómeno pudo haber contribuido al aumento de los niveles de contaminación. Además, se observó que algunas trayectorias dirigidas hacia la capital de Puebla y Atlixco (marcadas en

rojo y verde en Google Earth) mostraron una recirculación de contaminantes, lo que probablemente afectó también la calidad del aire en esas ciudades.

Figura 22

Modelación de trayectorias en HYSPLIT para el incendio ocurrido el 26 de julio de 2022



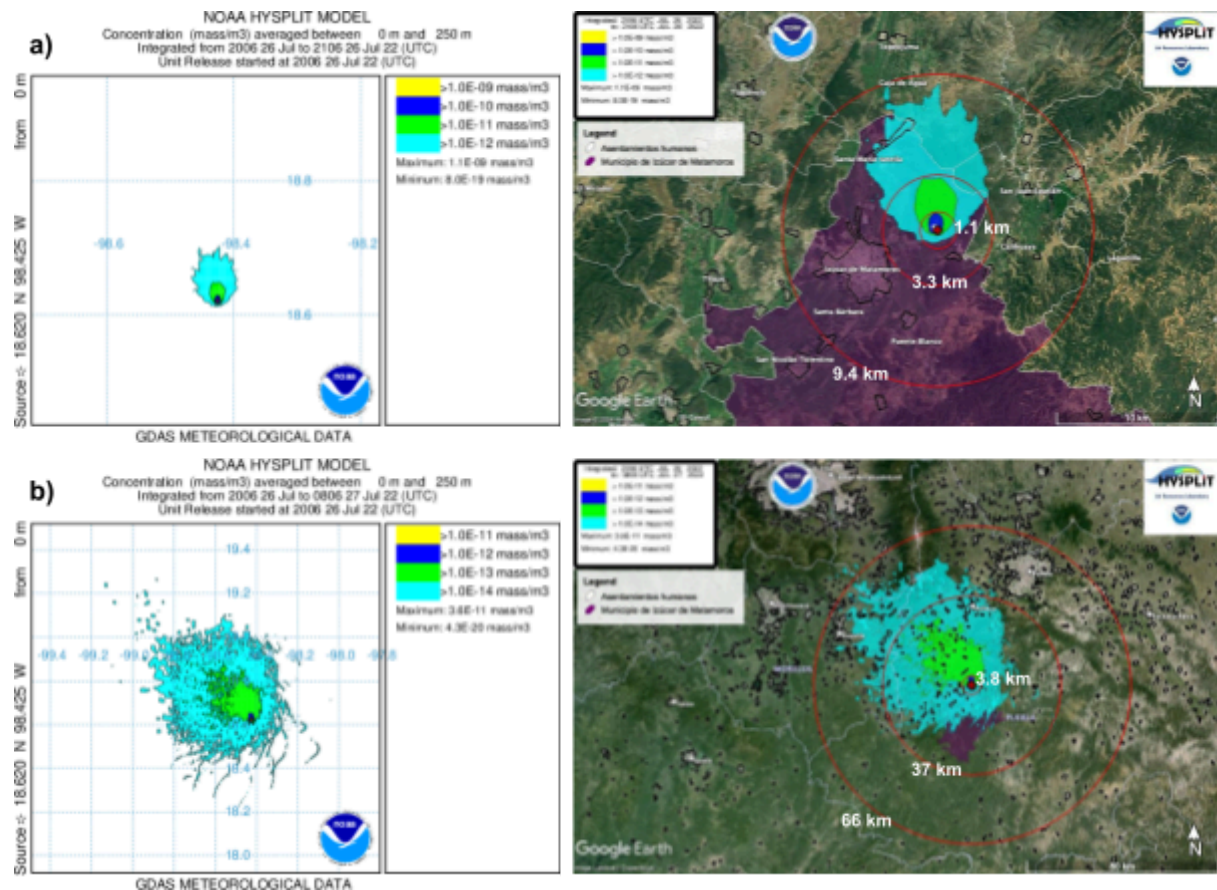
Fuente: En la izquierda la simulación en HYSPLIT y a la derecha su representación en Google Earth, por NOAA, 2024. De dominio público.

La Figura 23a ilustra la simulación de la dispersión de las emisiones del incendio durante un lapso de una hora, desde las 20:06 hasta las 21:06 UTC (14:06 a las 15:06, hora Zona Centro de México). En este análisis, se registra que las emisiones se movieron hacia el Norte, alejándose 9.4 km de la zona urbana del municipio. En este intervalo, sólo dos localidades, Santa María Tatetla y La Galarza, fueron afectadas por las emisiones contaminantes, con las concentraciones más bajas ($1 \times 10^{-12} \text{ masa/m}^3$). Esta contaminación se extendió en un radio de 9.4 km, cubriendo un área de 46.5 km^2 (representada en celeste). Por otro lado, la Figura 23b muestra el cambio en el comportamiento de los factores meteorológicos después de 12 horas, desde las 20:06 hasta las 08:06 UTC (14:06 a las 02:06, hora Zona Centro de México). En esta evaluación, se nota que la pluma

contaminante modificó su dirección hacia el Oeste y Noroeste, alcanzando una extensión de 66 km después del período de modelación. Mediante el uso del mapa de Google Earth, se puede observar cómo los contaminantes comenzaron a impactar el Estado de Morelos, con la menor concentración ($1 \times 10^{-14} \text{ masa/m}^3$), cubriendo un área de $3,169 \text{ km}^2$ (representada en celeste). La Tabla 17 muestra que los contaminantes afectaron a 27 municipios del estado de Puebla, 11 del estado de Morelos y 3 del estado de México, sumando un total de 973,083 de población expuesta.

Figura 23

Modelación en HYSPLIT de la dispersión de contaminantes, 26 de julio de 2022



Fuente: (a) Dispersión de contaminantes transcurrida 1 hora y (b) Dispersión de contaminantes transcurridas 12 horas, por NOAA, 2024. De dominio público.

Tabla 17

Estados, municipios y población potencialmente expuesta por el incendio ocurrido el 26 de julio de 2022

Estado	Clave	Municipio	Clave	Población total
México	15	Atlautla	15	31,900
México	15	Ecatzingo	34	10,827
México	15	Tepetlixpa	94	20,500
Morelos	17	Atlatlahucan	2	25,232
Morelos	17	Axochiapan	3	39,174
Morelos	17	Cuautla	6	187,118
Morelos	17	Jantetelco	10	18,402
Morelos	17	Jonacatepec de Leandro Valle	13	16,694
Morelos	17	Ocuituco	16	19,219
Morelos	17	Tetela del Volcán	22	14,853
Morelos	17	Yecapixtla	30	56,083
Morelos	17	Zacualpan de Amilpas	32	9,965
Morelos	17	Temoac	33	16,574
Morelos	17	Hueyapan	36	7,855
Puebla	21	Acteopan	5	3,070
Puebla	21	Ahuatlán	7	3,162
Puebla	21	Atlixco	19	141,793
Puebla	21	Atzala	21	1,512
Puebla	21	Atzitzihuacán	22	12,857
Puebla	21	Cohuecan	33	5,403
Puebla	21	Chietla	51	37,030
Puebla	21	Epatlán	62	4,943
Puebla	21	Huaquechula	69	29,233
Puebla	21	Izúcar de Matamoros	85	82,809
Puebla	21	Nealtican	102	14,075
Puebla	21	Ocoyucan	106	42,669
Puebla	21	San Diego la Mesa Tochimiltzingo	121	1,270
Puebla	21	San Gregorio Atzompa	125	9,671

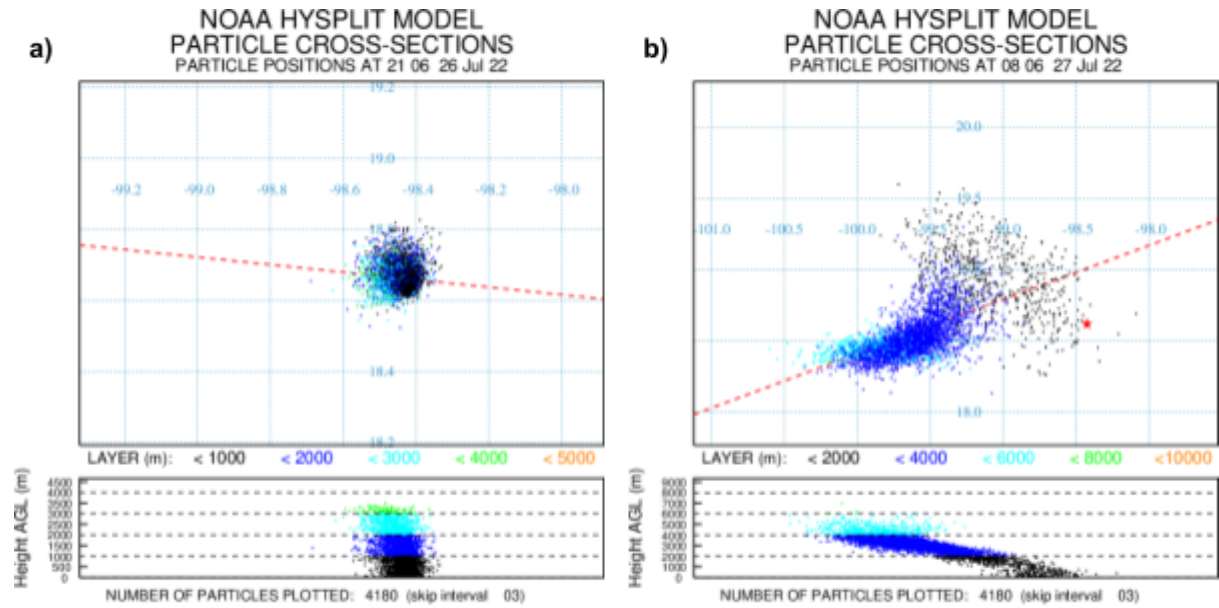
Estado	Clave	Municipio	Clave	Población total
Puebla	21	San Jerónimo Tecuanipan	126	6,597
Puebla	21	San Martín Totoltepec	133	692
Puebla	21	San Nicolás de los Ranchos	138	11,780
Puebla	21	Santa Isabel Cholula	148	11,498
Puebla	21	Teopantlán	159	3,836
Puebla	21	Tepemaxalco	165	1,216
Puebla	21	Tepeojuma	166	8,918
Puebla	21	Tepexco	168	7,523
Puebla	21	Tianguismanalco	175	14,432
Puebla	21	Tilapa	176	9,664
Puebla	21	Tlapanalá	185	10,344
Puebla	21	Tochimilco	188	19,315
Puebla	21	Xochiltepec	201	3,375
Total municipios:		41	Total población expuesta:	973,083

Fuente: Elaborado a partir de *Marco Geoestadístico*, de INEGI, 2022 (<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463770541>). Todos los derechos reservados 2022 por Licenciatario. Adaptado con permiso del autor.

Después de transcurrir la primera hora desde el inicio del incendio, podemos notar en la Figura 24a que a las 21:06 UTC (15:06, hora Zona Centro de México), las partículas se encontraban presentes en una columna vertical que alcanzó los 3500 metros de altura sobre el nivel del suelo. Ahora, pasadas 12 horas, a las 08:06 UTC (02:06 hora Zona Centro de México) como se muestra en la Figura 24b, se evidencia que una cantidad de partículas permaneció dentro de la CLP, corroborando lo observado en la Figura 22 respecto a las trayectorias. No obstante, la mayoría de las partículas se localizaron por encima de los 2000 metros de altitud y, debido a las condiciones meteorológicas, especialmente la velocidad del viento, estas se dispersaron a distancias más largas.

Figura 24

Modelación en HYSPLIT de la dispersión de partículas, 22 de julio de 2022



Fuente: (a) Dispersión de partículas transcurrida 1 hora y (b) Dispersión de partículas transcurridas 12 horas, por NOAA, 2024. De dominio público.

9. Conclusiones

Tras analizar detalladamente los 164 registros de incendios recopilados a través del satélite SNPP utilizando el instrumento VIIRS C2 de FIRMS NASA, se seleccionaron los eventos del 9 de abril de 2019, 26 de diciembre de 2019, 5 de mayo de 2021 y 26 de julio de 2022 debido a su alta temperatura de brillo registrada.

Las simulaciones de trayectoria realizadas con HYSPLIT proporcionaron información valiosa sobre el movimiento de las masas de aire, revelando que, con la excepción del incendio del 26 de diciembre de 2019, cuyas emisiones se restringen principalmente al estado de Puebla debido a su baja altitud (<1500 m), los demás incendios afectaron a otros estados como Morelos, México y Guerrero.

En cuanto a la dispersión de contaminantes, aunque las simulaciones de HYSPLIT no proporcionan información directa sobre la calidad del aire inhalado en el momento, sirvieron como referencia para identificar las áreas con mayores y menores concentraciones de contaminantes. Se observó que, aunque Izúcar de Matamoros fue el municipio más afectado por ser la fuente de las emisiones contaminantes, los municipios vecinos como Tepeojuma, San Martín Totoltepec, Axochiapan, Chietla, Tlapanalá, Tilapa, Tepexco, Epatlán, Xochiltepec, Atzala y Ahuatlán también recibieron las masas contaminantes en al menos tres de los cuatro incendios modelados.

Este estudio subraya la importancia de considerar los factores meteorológicos y los patrones atmosféricos en la dispersión de emisiones contaminantes, así como el impacto que estas pueden tener en las comunidades circundantes. Dados los riesgos asociados, como el desarrollo de enfermedades respiratorias y la mortalidad cardiovascular, es esencial implementar medidas de prevención y gestión efectivas. La instalación de estaciones de monitoreo de calidad del aire sería una medida crucial para enriquecer futuras investigaciones y abordar de manera más eficaz los impactos adversos de estos eventos en la salud pública.

10. Referencias

- Canal 13 Puebla. (2022, 23 de noviembre). *Comenzó la temporada de la zafra en Izúcar de Matamoros* [Archivo de video]. Youtube.
<https://www.youtube.com/watch?v=kWwq6LSSmsU>
- Cole, J. (2001, 19 de marzo). *Biomass Burning*. NASA Earth Observatory.
<https://earthobservatory.nasa.gov/features/BiomassBurning>
- Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. (2017, 31 de diciembre). *Normas Oficiales Mexicanas (NOM) de Calidad del Aire Ambiente*. Gobierno de México.
<https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/4-normas-oficiales-mexicanas-nom-de-calidad-del-aire-ambiente>
- Environmental Protection Agency. (2016, 22 de agosto). *Red de Transferencia de Tecnología Centro de Información sobre Contaminación de Aire (CICA) para la frontera entre EE. UU. - México*. Environmental Protection Agency.
https://www3.epa.gov/ttnatc1/cica/airq_s.html
- European Environment Agency. (2016, 20 de abril). *Dispersal of air pollutants*. European Environment Agency.
<https://www.eea.europa.eu/publications/2599XXX/page005.html>
- Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database. (2023, 24 de marzo). *Crops and livestock products*. FAO.
<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>
- Gallego, A., González, I., Sánchez, B., Fernández, P., Garcinuño, R. M., Bravo, J. C., Pradana, J. A., García, A., & Durand, J. S. (2012). *Contaminación atmosférica*. UNED Universidad Nacional de Educación a Distancia.
<https://elibro.bibliotecabuap.elogim.com/es/ereader/bibliotecasbuap/48595?page=1>

- García, J. A. (2023). *Curso – Taller para Pronóstico de Calidad del Aire*. Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático.
https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/870916/Cuadernillo_sesion_6.pdf
- Gobierno de Izúcar de Matamoros. (s.f.). *Plan de Desarrollo Municipal de Izúcar de Matamoros 2021 - 2024*. Izúcar. Consultado el 1 de junio de 2023.
https://www.izucar.gob.mx/plan_de_desarrollo_municipal/
- Haby, J. (s.f.). *The planetary boundary layer*. National Weather Service.
https://www.weather.gov/source/zhu/ZHU_Training_Page/clouds/planetary_boundary_layer/PBL.html
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2022). *Marco Geoestadístico*. INEGI.
<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463770541>
- Karanasiou, A., Alastuey, A., Amato, F., Renzi, M., Stafoggia, M., Tobias, A., Reche, C., Forastiere, F., Gumy, S., Mudu, P., & Querol, X. (2021). Short-term health effects from outdoor exposure to biomass burning emissions: A review. *Science of The Total Environment*, 781(10), 146739. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146739>
- Leelőssy, Á., Molnár, F., Izsák, F., Havasi, Á., & Lagzi, I. (2014). Dispersion modeling of air pollutants in the atmosphere: a review. *Open geosciences*, 6(3), 257-278.
<https://doi.org/10.2478/s13533-012-0188-6>
- Belalcazar, L. (2020, 26 de noviembre). *Uso de Hysplit para el estudio de la calidad del aire* [Archivo de video]. Youtube.
<https://www.youtube.com/watch?v=h0eMtoxcF5E&t=5059s>
- Martínez-Valenzuela, C., Rodríguez-Quintana, A. R., Meza, E., Waliszewski, S. M., Amador-Muñoz, O., Mora-Romero, A., Calderón-Segura, M. E., Félix-Gastélum, R., Rodríguez-Romero, I., & Caba, M. (2015). Cytogenetic biomonitoring of occupationally exposed workers to ashes from burning of sugar cane in Ahome, Sinaloa, México. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 40(2), 397-401.
<https://doi.org/10.1016/j.etap.2015.07.010>

- Mugica-Alvarez, V., Hernández-Moreno, A., Valle-Hernández, B. L., Espejo- Montes, F., Millán-Vázquez, F., & Torres-Rodríguez, M. (2017). Characterization and modeling of atmospheric particles from sugarcane burning in Morelos, Mexico. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 23(5), 1056-1071. <https://doi.org/10.1080/10807039.2017.1300767>
- Mugica-Álvarez, V., Hernández-Rosas, F., Magaña-Reyes, M., Herrera-Murillo, J., Santiago-De La Rosa, N., Gutiérrez-Arzaluz, M., Figueroa-Lara, J. 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>
- Mugica-Alvarez, V., Santiago-de la Rosa, N., Figueroa-Lara, J., Flores-Rodríguez, J., Torres-Rodríguez, M., & Magaña-Reyes, M. (2015). Emissions of PAHs derived from sugarcane burning and processing in Chiapas and Morelos México. *Science of the Total Environment*, 527(528), 474-482. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.089>
- National Aeronautics and Space Administration. (2021, 2 de abril). *About FIRMS*. Earthdata. <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/find-data/near-real-time/firms/about-firms#ed-firms-background>
- National Aeronautics and Space Administration. (2024, 27 de marzo). *FIRMS Frequently Asked Questions*. Earthdata. <https://www.earthdata.nasa.gov/faq/firms-faq>
- National Aeronautics and Space Administration. (s.f.). *Layer Information: VIIRS (Suomi NPP, NOAA-20 and NOAA-21) Fires and Thermal Anomalies (Day | Night, 375m)*. FIRMS. https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/descriptions/FIRMS_VIIRS_Firehotspots.html
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (s.f.). *Transport-Dispersion Modeling*. NOAA Air Resources Laboratory. Consultado el 6 de mayo de 2023. <https://www.arl.noaa.gov/research/atmospheric-transport-and-dispersion/atd-program-s-ready/>

- National Oceanic and Atmospheric Administration. (s.f.). *HYSPLIT model limitations, product interpretation, and information.* HYSPLIT.
<https://www.hysplit-pub.noaa.gov/hysplitpublic/limitations.html>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2023, 31 de mayo). *Global Data Assimilation System (GDAS1) Archive Information.* READY.
<https://www.ready.noaa.gov/index.php>
- Navarro, A. E., Arroyo, O., Ruiz, M., Gárate, G., & Rentería, C. (2006). El particulado atmosférico y su relación con la quema de biomasa. *Revista Cubana de Química*, 19(1), 2235-2238. <https://navarrof.orgfree.com/Investigacion/ParticuladoCLAQ.pdf>
- Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica. (2023, 18 de abril). *Layers of the Atmosphere.* National Oceanic and Atmospheric Administration.
<https://www.noaa.gov/jetstream/atmosphere/layers-of-atmosphere>
- Organización Mundial de la Salud. (s.f.). *Air pollution.* World Health Organization (WHO). Consultado el 4 de mayo de 2023.
https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1
- Representación de Agricultura en Puebla. (2018, 13 de noviembre). *Inicia temporada de zafra en Puebla.* Gobierno de México.
<https://www.gob.mx/agricultura/puebla/articulos/inicia-temporada-de-zafra-en-puebla?idiom=es>
- Ruiz, M., Arroyo, O., & Navarro, A. E. (2004). Estudio de la contribución de partículas suspendidas por la quema de caña en la calidad del aire. *Memorias del 2do Foro de Transferencia de Tecnología en el Sector Agropecuario en el Estado de Puebla, Izúcar de Matamoros, Puebla, México,,* 27-29.
<http://www.naturalezaytecnologia.com/index.php/nyt/article/view/104>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019, 20 de agosto). *Etapas del cultivo de caña.* Gobierno de México.
<https://www.gob.mx/agricultura/articulos/etapas-del-cultivo-de-cana>

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2021, 13 de 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 Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). *Fuentes de Contaminación Atmosférica*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/fuentes-de-contaminacion-atmosferica>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2023, 14 de febrero). *Informe del Medio Ambiente*. Gobierno de México. <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe18/tema/cap5.html#tema1>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (s.f.). *Marco normativo vigente en materia de contaminantes*. Gobierno de México. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2018/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServletd54a.html

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales y Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2007). *NOM-015/SEMARNAT/SAGARPA-2007: Que establece las especificaciones técnicas de métodos de uso del fuego en los terrenos forestales y en los terrenos de uso agropecuario*.

Sistema de Información para la Integración del Balance. (s.f.). *Estudio de gran visión para la identificación de necesidades de riego y drenaje en las zonas de abasto cañeras y propuestas de tecnificación en zonas potenciales como base para el desarrollo de proyectos de inversión. Etapa I*. Gobierno de México. <https://siiba.conadesuca.gob.mx/siica/Consulta/verDoc.aspx?num=79>

Sistema de Información para la Integración del Balance. (s.f.). *Plan rector del sistema producto caña de azúcar*. Gobierno de México. <https://siiba.conadesuca.gob.mx/siica/Consulta/verDoc.aspx?num=26>

Sistema de Monitoreo de la Calidad del Aire del Estado de Durango. (2019). *Contaminantes criterio*. SIMCA DGO. <http://calidadaire.durango.gob.mx/contaminantes.php>

- Subterráneos. (2015, 25 de noviembre). *Plantación de caña de azúcar en Atencingo/ Subterráneos* [Archivo de video]. Youtube.
<https://www.youtube.com/watch?v=gU4Nyf9lv8>
- Trini, S. (2021). The Lagrangian Approach to Dispersion Modeling: Why We Like It (and What We Did with It). *Air Pollution Modeling and its Application XXVII*, 27, 217-228.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-63760-9_31
- Flores-Garnica, J. G. y Flores-Rodriguez A. G. (2020). Análisis comparativo del número e intervalos de clases de riesgo de incendios forestales. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11 (62), 5-30. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i62.775>