

UNIVERSIDAD  
AUTONOMA  
METROPOLITANA



Casa abierta al tiempo

**Azcapotzalco**

---

**MAESTRÍA EN CIENCIAS E INGENIERÍA AMBIENTAL**

**VARIACIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL DE LAS EMISIONES DEL PROCESO  
DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN LAS ZONAS DE ZACATEPEC Y JOJUTLA,  
EN MORELOS, MÉXICO.**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS E INGENIERIA  
AMBIENTAL**

**PRESENTA:**

**I.B.I FATIMA DE LOS ANGELES ESPEJO MONTES**

**DRA. VIOLETA MUGICA ALVAREZ  
ASESORA**

**CIUDAD DE MÉXICO**

**14 MARZO 2016**

## **Reconocimiento**

**Esta Tesis de Maestría fue desarrollada gracias a la beca de Posgrado asignada por**

**CONACYT a**

**FATIMA DE LOS ANGELES ESPEJO MONTES**

**No. CVU 371651**

**Forma parte del programa de la Maestría en Ciencias e Ingeniería Ambientales de la**

**Universidad Autónoma Metropolitana**

**Unidad Azcapotzalco**

## **AGRADECIMIENTOS**

- Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**CONACYT**) por facilitar los medios económicos para la realización de este trabajo.
- A la Universidad Autónoma Metropolitana (**UAM-Azcapotzalco**) por formar parte de esta alma mater.
- Al área de Química Aplicada de la **UAM-Azcapotzalco**, en especial a la **Dra. Violeta Mugica Alvarez**, por permitir realizar este trabajo en sus laboratorios y el uso de la infraestructura y material empleado en el desarrollo de la tesis, asimismo su asesoría. Al personal del que me brindó su apoyo en el trabajo experimental.
- Al Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (**INECC**) por brindarnos el apoyo en el préstamo de equipos.
- A la Coordinación de la División de Estudios de Postgrado de la Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco, por todo el apoyo brindado.
- A mis sinodales por su tiempo e intervención en este proyecto.

## DEDICATORIAS

- A **Dios**; porque me dio esta gran oportunidad de continuar con una meta más.
- A **mi Madre**; por todo su apoyo, su tiempo y por todo el esfuerzo que ha dado para que yo continuara estudiando y logre mis metas.
- A **mi Padre**; por su apoyo y consejos.
- A **mi hermano**; que siempre ha estado para mí en todo momento, por motivarme a superarme.
- A **mi Abuelo**; quien me motivo a continuar en este hermoso camino de la investigación.
- A **mis Abuelos**; y a mi padre que me han apoyado para continuar con mis estudios.
- A la **Dra. Violeta Mugica Alvarez**; por su apoyo, tiempo y asesoría.
- A mi amigo **Arturo Ruelas**; por su apoyo incondicional.
- A la **Dra. Jordina Belmonte**; por su asesoría.

## LISTA DE TÉRMINOS Y ACRÓNIMOS

$\lambda$	Longitud de onda
$\mu\text{ g m}^{-2}$	Microgramo por centímetro cuadrado
$\mu\text{ g m}^{-3}$	Microgramo por metro cubico
$\sigma_y$	Desviación estándar en y
$\sigma_z$	Desviación estándar en z
<b>BC</b>	Carbono negro (por sus siglas en inglés)
<b>CO</b>	Monóxido de carbono
<b>CO<sub>2</sub></b>	Dióxido de carbono
<b>CO<sub>2</sub> eq</b>	Dióxido de carbono equivalente
<b>COV</b>	Compuestos Organicos Volátiles
<b>CVC</b>	Contaminantes de vida corta
<b>EC</b>	Carbono elemental (por sus siglas en inglés)
<b>GEI</b>	Gases de efecto invernadero
<b>Gg</b>	Gigagramos
<b>GWP</b>	Índice del potencial de calentamiento global
<b>Ha</b>	Hectáreas
<b>HPA</b>	Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos
<b>HR</b>	Humedad relativa
<b>IPCC</b>	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
<b>Kg</b>	Kilogramos
<b>kg año<sup>-1</sup></b>	Kilogramo por año
<b>LPM</b>	Litros por minuto
<b>Min</b>	Minutos
<b>m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup></b>	Metros cúbicos por hora
<b>OC</b>	Carbono orgánico (por sus siglas en inglés)
<b>PM<sub>2.5</sub></b>	Partículas atmosféricas menores a 2.5 $\mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico
<b>PM<sub>10</sub></b>	Partículas atmosféricas menores a 10 $\mu\text{m}$ de diámetro aerodinámico
<b>t</b>	Tonelada
<b>t ha<sup>-1</sup></b>	Toneladas por hectárea

## Resumen

Durante el proceso agrícola de la caña de azúcar se realizan dos actividades de gran impacto ambiental relacionadas con el funcionamiento del Ingenio y quema de biomasa; debido a la combustión incompleta de la caña de azúcar se emiten partículas atmosféricas, aerosoles de carbono negro, monóxido (CO) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), compuestos orgánicos volátiles y trazas de elementos.

En el Estado de Morelos, México se carecía de un estudio para determinar la calidad de aire cuando se realiza la quema de caña de azúcar como parte de su proceso agrícola; en la presente investigación se cuantificó la concentración de partículas atmosféricas PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en los municipios de Zacatepec de Hidalgo, Jojutla y la Localidad de Galeana en el estado de Morelos, durante tres campañas durante los meses de febrero a junio del año 2014 que incluían actividad agroindustrial, con actividad industrial y sin actividad.

La proporción de partículas PM<sub>2.5</sub> con actividad agroindustrial respecto a solo actividad industrial es de 1.37 veces más alta, mientras que al comparar la actividad industrial con la época sin actividad es 3.7 veces más alta y hasta 5.1 veces mayor en actividad agroindustrial respecto a en ausencia de actividad.

Galeana presentó el mayor aumento en la concentración de PM<sub>10</sub> durante la actividad industrial y Jojutla una mayor concentración de PM<sub>2.5</sub> en actividad agroindustrial. Con base en los resultados obtenidos se concluyó que la quema de caña como parte de su proceso agrícola afecta la calidad del aire, lo que implica un mayor riesgo para la salud de los habitantes de la región, debido a que durante la actividad agroindustrial más del 90% de las concentraciones sobrepasan los límites permisibles de la NOM-025-SSA1-2014.

Se realizó la cuantificación de carbono elemental por el método termo-óptico (OC/EC Laboratory), en Zacatepec y Jojutla. Se determinó que la concentración de carbono elemental es mayor durante la actividad agroindustrial comparada con la actividad industrial y en ausencia de actividad y estos datos fueron estadísticamente significativos.

Para conocer el impacto de las emisiones de partículas en la población cercana, se aplicaron modelos de dispersión capaces de identificar las zonas que presentarán concentraciones más altas de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, dependiendo de las características de la fuente de emisión y de los parámetros meteorológicos como: velocidad y dirección del viento, a través de la ecuación de Gauss, donde las concentraciones máximas del modelado en PM<sub>10</sub> son de 107 µg m<sup>-3</sup> y de PM<sub>2.5</sub> 57 µg m<sup>-3</sup>.

Para el modelado de la dispersión de partículas provenientes de la quema de la caña, se utilizaron algunas ecuaciones del Modelo de V Smoke, basado en modelos Gaussianos, para conocer las zonas con mayores concentraciones de partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, se observó que en el día 3 de Diciembre de 2013 se quemaron 114 ha afectando las localidades de Jojutla, Pedro Amaro y Tlatenchi por concentraciones de partículas PM<sub>10</sub> que pueden ir de 4 412 a 44 120 µg m<sup>-3</sup> y de partículas PM<sub>2.5</sub> que pueden ir de 3 117 a 31 178 µg m<sup>-3</sup>, afectando cerca de 51 604 habitantes.

## Abstract

During the agricultural process of sugarcane two high-impact activities are made, operation of Ingenious and biomass burning are carried out; First to facilitate harvesting and the second to eliminate the agricultural waste. Due to the incomplete combustion of sugarcane atmospheric particles are emitted, aerosols of Black Carbon monoxide (CO) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), volatile organic compounds and traces of elements are emitted. Mexico lacks the Study to determine what is the Impact to air quality when there is burning of sugarcane as part of its agricultural process; in the current investigation it was quantified the concentration of atmospheric particles PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> in Zacatepec, Jojutla and Galeana in the state of Morelos, during three campaigns which are with agro-industrial activity, industrial activity and without activity.

The proportion of particles PM<sub>2.5</sub> in agroindustrial activity with respect to single industrial activity is 1.37 times higher, while industrial activity comparing with the time without activity is 3.7 times higher and up to 5.1 times higher in agroindustrial activity in respect absence of activity.

Galeana had the highest increase in the concentration of PM<sub>10</sub> during the Industrial Activity and Jojutla with higher concentrations of PM<sub>2.5</sub> in agro-industrial activity. With the basis of the results obtained it was concluded that the burning of cane as part of its agricultural process affects the quality of air, which implies a major risk for health of the Inhabitants of the region because during the agro-industrial activity over 90% of the concentrations exceed the permitted limit of the NOM-025-SSA1-2014.

Black Carbon quantification was performed by thermo-optical (OC / EC Laboratory) method. In urban areas Zacatepec and Jojutla. It was determined that the concentration of black carbon is significantly major during the agro-industrial activity in comparison to industrial activity and that in the absence of activity.

To understand the impact of particulate emissions in the nearby town, dispersion models can identify areas that present higher concentrations of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>, depending on the characteristics of the emission source and meteorological parameters were applied as wind speed and direction, through the Gauss equation where the maximum concentrations of modeling PM<sub>10</sub> are 107 µg m<sup>-3</sup> and PM<sub>2.5</sub> 57 µg m<sup>-3</sup>.

For modeling the dispersion of particles from burning cane, some equations V Model Smoke, based on Gaussian models, to find areas with higher concentrations of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> particles, it was observed that used in on December 3, 2013 burned 114 has affected the towns of Jojutla, Pedro Amaro and Tlatenchi by concentrations of PM<sub>10</sub> particles can range from 4 412 to 44 120 µg m<sup>-3</sup> and PM<sub>2.5</sub> particles that can go of 3 117 to 31 178 µg m<sup>-3</sup>, affecting about 51 604 habitants.

## Tabla de contenido

Introducción .....	13
<b>Capítulo 1 Antecedentes y Justificación .....</b>	<b>15</b>
1.1 Justificación: .....	15
1.2 Hipótesis: .....	15
1.3 Objetivo General: .....	15
<b>Capítulo 2. La Industria azucarera de México .....</b>	<b>16</b>
2.1 Fideicomiso Ingenio Emiliano Zapata en el Estado de Morelos .....	17
2.2 Caña de azúcar, cultivo y cosecha. ....	18
2.2.1 La caña de azúcar .....	18
2.2.2 El cultivo de la caña de azúcar .....	18
2.2.3 Cosecha y Quema de la caña. ....	20
2.2.4 El proceso de producción de la caña de azúcar .....	21
2.2.5 Caldera .....	24
<b>Capítulo 3. Impactos al medio ambiente y a la salud por el proceso de la caña.....</b>	<b>25</b>
3.1 Impactos al medio ambiente .....	25
3.1.1 Emisiones de gases de efecto invernadero y sus implicaciones en el cambio climático. ....	29
3.1.2 Emisiones de partículas atmosféricas PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> .....	32
3.1.3 Carbono negro y carbono orgánico.....	33
3.2 Efectos a la salud por la cosecha y el proceso industrial de la caña.....	36
<b>Capítulo 4. Marco teórico .....</b>	<b>39</b>
4.1 Modelado del proceso y de la quema de caña de azúcar .....	39
4.1.1 Modelos de dispersión .....	39
4.1.2 Modelado Gaussiano de emisiones por quema .....	46
<b>Capítulo 5. Metodología.....</b>	<b>50</b>
5.1 Diseño de Campañas:.....	50
5.2 Método de Análisis de orgánicos y elementales de carbono Aerosoles.....	53
5.3 Aplicación de un Modelo Gaussiano .....	56
5.4 Modelado Gaussiano de emisiones por quemas .....	57
<b>Capítulo 6. Análisis de Resultados .....</b>	<b>59</b>
6.1 Concentración de PM <sub>2.5</sub> Y PM <sub>10</sub> Zacatepec, Morelos .....	59
6.2 Concentración de PM <sub>2.5</sub> Y PM <sub>10</sub> Galeana, Morelos .....	61
6.3 Concentración de PM <sub>2.5</sub> Y PM <sub>10</sub> Jojutla, Morelos.....	64
6.4 Análisis meteorológico .....	67



6.5 Concentración Carbono negro (EC) y carbono orgánico(OC) en PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10</sub> , en Zacatepec y Jojutla, Morelos. ....	70
6.6 Resultados del modelado de dispersión Gaussiana.....	79
6.7 Modelado de la dispersión de partículas por la quema .....	83
<b>Conclusiones:</b> .....	102
<b>Referencias:</b> .....	103

## Índice de Figuras

Figura 1: Estados en donde se siembra caña de azúcar en México. ....	17
Figura 2: Fideicomiso Ingenio Emiliano Zapata. ....	17
Figura 3: Impactos ambientales a partir del ciclo de cultivo de la caña de azúcar. ....	20
Figura 4: Impactos Ambientales derivados del proceso de elaboración de azúcar a partir de la caña de azúcar. ....	23
Figura 5: Diagrama de impactos derivados del proceso de cultivo al campo.....	27
Figura 6: Impactos al ambiente generados por el proceso de producción de azúcar .....	29
Figura 7: Proporción de gases efecto invernadero Fuente: IPCC, 2007 .....	29
Figura 8: Diagrama de Efecto invernaderoFuente Modificación UNEP-GRID-Arenald.....	31
Figura 9: Diagrama de bloques en términos de GEI por proceso de caña de azúcar.....	31
Figura 10: Composición Química de los Aerosoles Fuente: Jacob, 1999. ....	33
Figura 11: Balance radiativo del planeta por la presencia de aerosoles de carbono negro. ....	34
Figura 12: Proyección satelital de Carbono negro. ....	34
Figura 13: Proyección satelital emisión Industrial y por Biomasa de Carbono negro.....	34
Figura 14: Fuentes latinoamericanas de carbono negro según el sector de emisión. ....	35
Figura 15: Esquema de la deposición de partículas atmosféricas en el sistema respiratorio en función del diámetro. Fuente: Modificado del Dr. Laskus. ....	37
Figura 16: Dimensiones del cubo usado para el balance de materia .....	42
Figura 17: Función de Distribución Gaussiana o Normal. ....	43
Figura 18: Esquema de la pluma Gaussiana en dirección del viento x .....	44
Figura 19 : Esquema de una Estación Sinóptica Meteorológica. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional, México .....	45
Figura 20: Gráfica de modelo Gaussiano en dirección del viento u. ....	47
Figura 21: Localización de los equipos de muestreo .....	51
Figura 22: Estándar de calibración de flujo de alto volumen .....	51
Figura 23: Equipos de muestreo de alto y bajo volumen.....	52
Figura 24.Procedimiento de pesado de filtros en balanza analítica y en micro balanza. ....	52
Figura 25: Diagrama de funcionamiento de Equipo Sunset Laboratory .....	54
Figura 26: Termograma para el contenido de carbón orgánico (OC), carbonato (CC), y carbón elemental (EC) en el filtro de muestra. PC es el carbón generado pirolíticamente “tostado”. El pico final corresponde a la calibración con Metano. ....	55
Figura 27: Equipo para cuantificar aerosoles carbonaceos.....	55
Figura 28: Mapa de la ubicación de las calderas del Ingenio Emiliano Zapata (izquierda) y esquema de pluma Gaussiana en dirección de viento x (derecha). ....	56
Figura 30: Concentraciones de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> en Zacatepec, Morelos. ....	59
Figura 31: Concentraciones de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> en Zacatepec, Morelos. ....	59
Figura 33: Diagrama de caja y bigotes de Zacatepec PM <sub>2.5</sub> . ....	61

Figura 34: Diagrama de caja y bigotes de Zacatepec PM <sub>10</sub> .....	61
Figura 35: Concentraciones de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> en Galeana, Morelos.....	62
Figura 36: Concentraciones de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> en Galeana, Morelos.....	62
Figura 37: Concentraciones de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> en Galeana.....	62
Figura 38: Diagrama de caja y bigotes de Galeana PM <sub>2.5</sub> .....	63
Figura 39: Diagrama de caja y bigotes de Galeana PM <sub>10</sub> .....	64
Figura 40: Concentraciones de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> en Jojutla.....	64
Figura 41: Concentraciones de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> en Jojutla.....	65
Figura 42: Concentraciones de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> en Jojutla.....	65
Figura 43: Diagrama de caja y bigotes de Jojutla PM <sub>2.5</sub> .....	66
Figura 44: Diagrama de caja y bigotes de Jojutla PM <sub>10</sub> .....	66
Figura 45: Ubicación de la estación metereologica ESIME.....	67
Figura 46: Rosa de viento correspondiente al periodo de actividad agroindustrial.....	68
Figura 47: Rosa de viento correspondiente al periodo de actividad agroindustrial.....	68
Figura 48: Rosa de viento correspondiente al periodo de actividad agroindustrial.....	69
Figura 49: Concentración de EC y OC en PM <sub>2.5</sub> Zacatepec, Morelos.....	70
Figura 50 : Concentración de EC y OC en PM <sub>2.5</sub> Zacatepec, Morelos.....	70
Figura 51: Concentración de EC y OC en PM <sub>2.5</sub> Zacatepec, Morelos.....	71
Figura 52: Concentración de EC y OC en PM <sub>10</sub> Zacatepec, Morelos.....	71
Figura 53: Concentración de EC y OC en PM <sub>10</sub> Zacatepec, Morelos.....	71
Figura 54: Concentración de EC y OC en PM <sub>10</sub> Zacatepec, Morelos.....	72
Figura 55: Diagrama de caja y bigotes de Zacatepec EC PM <sub>2.5</sub> .....	73
Figura 56: Diagrama de caja y bigotes de Zacatepec OC PM <sub>2.5</sub> .....	73
Figura 57: Diagrama de caja y bigotes de Zacatepec CT PM <sub>2.5</sub> .....	73
Figura 58: Diagrama de caja y bigotes de Zacatepec EC PM <sub>10</sub> .....	73
Figura 59: Diagrama de caja y bigotes de Zacatepec OC PM <sub>10</sub> .....	74
Figura 60: Diagrama de caja y bigotes de Zacatepec CT PM <sub>10</sub> .....	74
Figura 61: Concentraciones de EC y OC en PM <sub>2.5</sub> Jojutla, Morelos.....	74
Figura 62: Concentraciones de EC y OC en PM <sub>2.5</sub> Jojutla, Morelos.....	75
Figura 63: Concentraciones de EC y OC en PM <sub>2.5</sub> Jojutla, Morelos.....	75
Figura 64: Concentraciones de EC y OC en PM <sub>10</sub> Jojutla, Morelos.....	75
Figura 65: Concentraciones de EC y OC en PM <sub>10</sub> Jojutla, Morelos.....	76
Figura 66: Concentraciones de EC y OC en PM <sub>10</sub> Jojutla, Morelos.....	76
Figura 67: Diagrama de caja y bigotes de Jojutla EC PM <sub>2.5</sub> .....	77
Figura 68: Diagrama de caja y bigotes de Jojutla OC PM <sub>2.5</sub> .....	77
Figura 69: Diagrama de caja y bigotes de Jojutla CT PM <sub>2.5</sub> .....	78
Figura 70: Diagrama de caja y bigotes de Jojutla EC PM <sub>10</sub> .....	78
Figura 71: Diagrama de caja y bigotes de Jojutla OC PM <sub>10</sub> .....	78
Figura 72: Diagrama de caja y bigotes de Jojutla CT PM <sub>10</sub> .....	78
Figura 73: Ajuste de modelo Gaussiano con datos medidos de PM <sub>2.5</sub> .....	80
Figura 74: Ajuste de modelo Gaussiano con datos medidos de PM <sub>10</sub> .....	80
Figura 75: Ajuste de modelo Gaussiano con datos medidos de PM <sub>2.5</sub> .....	80
Figura 76: Ajuste de modelo Gaussiano con datos medidos de PM <sub>10</sub> .....	81
Figura 77: Ajuste de modelo Gaussiano con datos medidos de PM <sub>10</sub> .....	81
Figura 78: Ajuste de modelo Gaussiano con datos medidos de PM <sub>2.5</sub> .....	81
Figura 79: Ajuste de modelo Gaussiano con datos medidos de PM <sub>10</sub> .....	82
Figura 80: Ajuste de modelo Gaussiano con datos medidos de PM <sub>2.5</sub> .....	82
Figura 81: Concentraciones de PM <sub>2.5</sub> con Modelado Gaussiano.....	82
Figura 82: Concentraciones de PM <sub>10</sub> con Modelo Gaussiano.....	83

Figura 83: Esquema de cálculos sobre la fuente e iterador.....	84
Figura 84: Se muestra el esquema de la ubicación de parcelas quemadas zafra 2013-2014.....	85
Figura 85: Esquema del modelo, cálculos sobre la malla.....	86
Figura 86: Esquema de creación de superficies de interpolación .....	87
Figura 87: Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> (izquierda) y PM <sub>2.5</sub> (derecha), de las quemas del día 21/11/13 a las 20:00 h. ....	89
Figura 88: Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> , (izquierda) PM <sub>2.5</sub> (derecha), de las quemas del día 21/11/13 a las 20 h. ....	89
Figura 89: Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> (izquierda) y PM <sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 22/11/13 a las 13:00 h. ....	90
Figura 90: Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> (izquierda) y PM <sub>2.5</sub> (derecha), de las quemas del día 23/11/13 a las 13:00 h. ....	90
Figura 91: Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> (izquierda) y PM <sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 27/11/13 a las 16:00 h. ....	90
Figura 92: Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> (izquierda) y PM <sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 29/11/13 a las 4:00h. ....	91
Figura 93: Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> (izquierda) y PM <sub>2.5</sub> de las quemas del día 30/11/13 a las 11:00 h. ....	91
Figura 94: Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> (izquierda) y PM <sub>2.5</sub> (derecha) .....	92
Figura 95: Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> (izquierda) y PM <sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 02/12/13 a las 17:00 h. ....	92
Figura 96: Modelado de la concentración de partículas de PM <sub>10</sub> (izquierda) y PM <sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 03/12/13 a las 10:00 h. ....	92
Figura 97: Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> (izquierda) PM <sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 07/12/13 a las 11:00 h. ....	93
Figura 98: Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> (izquierda) y PM <sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 4/12/13 a las 10:00 h. ....	93
Figura 99: Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> (izquierda) y PM <sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 17/12 /13 a las 9:00h. ....	94
Figura 100: Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> (izquierda) y PM <sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 22/12/13 a las 22:00 h. ....	94
Figura 101: Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> (izquierda) y PM <sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 25/12/13 a las 17:00h. ....	94
Figura 102: Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> (izquierda) y PM <sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 10/01/14 a las 10:00h. ....	95
Figura 103: Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> (izquierda) y PM <sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 23/01/14 a las 22:00 h. ....	95
Figura 104: Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> (izquierda) PM <sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 28/01/14 a las 10:00 h. ....	96
Figura 105: Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> (izquierda) y PM <sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 04/02/14 a las 4:00 h. ....	96
Figura 106: Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> (izquierda) y PM <sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 10/02/2014 a las 4:00 h. ....	96
Figura 107: Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> (izquierda) y de PM <sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 17/02/14 a las 22:00 h. ....	97
Figura 108: Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> (izquierda) y PM <sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 03/03/14 a las 22:00 h. ....	97
Figura 109: Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> (izquierda) y PM <sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 21/03/14 a las 10:00 h. ....	97

Figura 110: Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> (izquierda) y PM <sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 22/03/14 a las 8:00 h. ....	98
Figura 111: Modelado de la concentración de partículas PM <sub>10</sub> (izquierda) y PM <sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 10/05/14 a las 20 h. ....	98
Figura 112: Modelado de la concentración de partículas de todas las quemas y las zonas de mayor impacto. ....	99

## Índice de Tablas

Tabla 1: Emisiones por quema de biomasa Estados Unidos Fuente: U.S. EPA2005.....	35
Tabla 2: Condiciones meteorológicas que definen las clases de estabilidad de Pasquill. ....	45
Tabla 3: Valores de constantes de acuerdo a la estabilidad y a la distancia. ....	46
Tabla 4: Diseño de campañas.....	50
Tabla 5: Características de las calderas del Ingenio .....	57
Tabla 6: Análisis estadístico de campañas en Zacatepec. ....	60
Tabla 7: Análisis estadístico de campañas en Galeana .....	63
Tabla 8: Resultados de las campañas realizadas en Jojutla. ....	66
Tabla 9: Datos meteorológicos durante el monitoreo. ....	67
Tabla 10: Concentraciones de PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub> en los tres sitios de muestreo.....	69
Tabla 11: Análisis estadístico de EC, OC Y CT en PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10</sub> en Zacatepec. ....	72
Tabla 12: Análisis estadístico de EC, OC Y CT en PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10</sub> en Jojutla. ....	77
Tabla 13: Información de quemas prescritas zafra 2013/2014 .....	88
Tabla 13: Eventos de quemas y número de localidades afectadas.....	100
Tabla 14: Principales localidades y población afectada .....	101
Tabla 15: Prueba estadística Mann-Whitney para PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10</sub> en Zacatepec, Morelos. ....	115
Tabla 16: Prueba estadística Mann-Whitney para PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10</sub> en Jojutla, Morelos.....	115
Tabla 17: Prueba estadística Mann-Whitney para PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10</sub> en Galeana, Morelos. ....	116
Tabla 18: Prueba estadística Mann-Whitney para EC en PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10</sub> en Zacatepec, Morelos. ....	116
Tabla 19: Prueba estadística Mann-Whitney para OC en PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10</sub> en Zacatepec, Morelos. ....	117
Tabla 20: Prueba estadística Mann-Whitney para CT en PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10</sub> en Zacatepec, Morelos. ....	117
Tabla 21: Prueba estadística Mann-Whitney para EC en PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10</sub> en Jojutla, Morelos.....	118
Tabla 22: Prueba estadística Mann-Whitney para OC en PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10</sub> en Jojutla, Morelos. ....	118
Tabla 23 : Prueba estadística Mann-Whitney para CT en PM <sub>2.5</sub> y PM <sub>10</sub> en Jojutla, Morelos.....	119

## Introducción

La caña de azúcar es un cultivo que tiene tanta importancia como el petróleo a nivel internacional (Crespo, 2013). Brasil es el primer productor de caña, mientras que México ocupa el quinto lugar (FAOSTAT, 2014).

México produce alrededor de 5 millones de t de azúcar, con un valor de más de 3 mil millones de dólares anuales, lo que representa cerca del 12 % del valor del sector primario; además el consumo per cápita es cercano a 48 kg año<sup>-1</sup> (PRONAC, 2007).

La producción de caña en México se realiza en 664 mil ha que abastecen a 57 ingenios de 15 estados cañeros. Es una actividad socioeconómica de gran importancia, los Estados de San Luis Potosí, Jalisco, Michoacán, Puebla, Veracruz, Chiapas y Morelos son los principales productores de caña, siendo el Estado de Veracruz el que tiene la mayor producción (SE, 2012). Sin embargo el Estado de Morelos tuvo una superficie de 16 726 ha cultivadas con una producción 1 959 194 t (SIAP, 2011).

Cabe Mencionar que el Estado de Morelos forma parte de la Megalópolis del Centro, la cual está integradas por: las Zonas Metropolitanas del Valle de México; Puebla-Tlaxcala; y Toluca-Lerma, así como por las aglomeraciones de Cuernavaca-Jiutepec, Cuautla, Pachuca y Tlaxcala (SEDESOL, CONAPO, INEGI, 2004), por lo que es de gran relevancia determinar el impacto de las emisiones de la calidad del aire. En este estudio se realizó el monitoreo de las emisiones en la zona cercana al Ingenio Emiliano Zapata, así como en la zona adjunta a los cañaverales en los municipios de Zacatepec y Jojutla así como en la localidad de Galeana.

El Estado de Morelos cuenta con 33 Municipios donde Zacatepec de Hidalgo es el principal productor de caña de azúcar, desde 1960 a la fecha los sembradíos de caña han abundado en las tierras de cultivo, por lo que son los principales medios de subsistencia de los pobladores, no sólo del municipio, sino de la región sur del Estado de Morelos (Fideicomiso Ingenio Emiliano Zapata, 2014).

La principal actividad económica de Zacatepec está dada por el Ingenio Azucarero el cual se mantiene trabajando durante un periodo de tiempo conocido como zafra, tiene una duración de 7 meses, (Noviembre a Mayo). Durante el proceso agrícola se realizan dos quemas. La primera antes de cosechar para la eliminación de malezas animales y microorganismos antes del corte y recogida de la caña, la segunda quema se hace para eliminar los residuos y dejar lista la zona para la siguiente siembra. Además de las quemas, el funcionamiento del Ingenio genera partículas por combustión incompleta, que pueden ser tóxicas por sus características físicas y químicas, dependiendo de su diámetro aerodinámico.

Los estudios sobre quemas de biomasa son escasos y en los trabajos se ha documentado principalmente el impacto de la contaminación del aire y en la salud de las poblaciones aledañas (Schwartz, 2000).

El impacto que tiene el carbono negro en el forzamiento radiativo del planeta se ha calculado con una aportación del 40% (Baron *et al.*, 2009).

Los tamaños de partícula  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  se relacionan con un diámetro menor a 10 y 2.5 micrómetros, respectivamente, están regulados en nuestro país por la NOM-025-SSA1-1993; siendo los límites máximos permisibles:  $75 \mu\text{g m}^{-3}$  para  $PM_{10}$  y  $45 \mu\text{g m}^{-3}$  para  $PM_{2.5}$  en promedio de 24 h.

En este estudio se monitoreo la concentración de partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  así como la concentración de carbono elemental, orgánico y total en Zacatepec y Jojutla, Morelos, para conocer las zonas con mayor impacto por la zafra.

# Capítulo 1 Antecedentes y Justificación

## 1.1 Justificación:

Se realizó un estudio preliminar en Zacatepec en el 2013, para conocer el impacto del Fideicomiso Ingenio Emiliano Zapata, el cual mostró que durante la zafra la calidad del aire es mala. Sin embargo el periodo de muestreo fue muy corto y se requería un estudio más prolongado para saber si durante los distintos meses de zafra se mantiene la mala calidad del aire, así como conocer las concentraciones de  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ , y CE a las que se encuentra expuesta la población cercana y estimar si es necesario tomar medidas preventivas de salud para la población. Por otra parte es necesario diferenciar el impacto de las emisiones del Ingenio con relación a las emisiones por la quema caña, para lo cual se debería realizar el estudio al menos en dos sitios, uno cercano al ingenio y otro cercano a los cañaverales. Asimismo, conociendo los datos de emisión del ingenio y las condiciones meteorológicas de la zona, es posible determinar la forma en que se transportan las emisiones hasta varios km a la redonda y comparar con las mediciones ambientales que se realicen. De particular importancia es el impacto de la industria cañera en el Estado de Morelos, ya que actualmente esta entidad es parte de la Megalópolis de la región centro que es la que tiene mayor población del país.

## 1.2 Hipótesis:

El proceso de la caña de azúcar al involucrar la quema de biomasa a cielo abierto y el uso del bagazo como combustible en el Ingenio azucarero, tiene como consecuencia el afectar la calidad del aire de la zona por la presencia de partículas en concentraciones mayores a las establecidas en la NOM-025-SSA1-2014 durante la temporada de zafra.

## 1.3 Objetivo General:

-Determinar la variación temporal y espacial de las emisiones provenientes de la quema y del proceso industrial de la caña de azúcar en tres sitios de Morelos: Zacatepec, Jojutla y Galeana.

### Objetivos específicos:

-Diseñar y Realizar 3 campañas de muestreo de partículas atmosféricas en los sitios de Zacatepec, Jojutla y Galeana en tres periodos: con actividad agroindustrial, con actividad industrial y en ausencia de actividad.

-Caracterizar las partículas  $PM_{10}$  Y  $PM_{2.5}$  colectadas en las dos zonas: Zacatepec, Jojutla y Galeana.

-Determinar las concentraciones de Carbono Elemental en Zacatepec y Jojutla.

-Determinar los patrones de dispersión de las emisiones del Ingenio Azucarero y determinar las zonas donde está más expuesta la población.

-Determinar los patrones de dispersión de las emisiones de las quemas agrícolas y determinar las zonas donde está más expuesta la población.

## Capítulo 2. La Industria azucarera de México

En México la agroindustria azucarera es históricamente de las más importantes por su gran relevancia, social, cultural, política y económica. (Sánchez, 1997; Crespo, 1988). Se inició desde la conquista cuando Hernán Cortes trasladó la caña de azúcar desde Cuba en 1522, creciendo esta a orillas del río Tepengo en Santiago Tuxtla, Veracruz (Maturana y Restrepo, 1970). Las tierras fértiles, así como las condiciones climáticas permitieron la expansión por todo el territorio mexicano, particularmente en los valles de Cuernavaca y de Cuautla, iniciando así la primera actividad industrial y productiva de la Nueva España, para producir azúcar entre los años 1550 y 1600, en ingenios como el de Tlaltenango, el cual era un ejemplo de eficiencia, incluso mayor que ciertas regiones del mundo (Sandoval, 1951).

Debido al incremento de la demanda por parte de los colonos a inicios del siglo XVII, la industria azucarera empezó a tomar un lugar importante colocándose como la industria más importante del país.

Con el paso de tiempo esta Agroindustria se ha ido recuperando pero no del todo, de varias situaciones y hechos, que la hacen un tema interesante y de actualidad. Entre los más relevantes se cuenta: la independencia en México (1810-1821) que trajo como consecuencia la destrucción de Ingenios y cañaverales provocando la caída de la producción del azúcar (Crespo, 1988).

La expansión del campo cañero comenzó con la incorporación de mejores técnicas para optimizar la operación de los Ingenios, formalizándose y tomando más fuerza como industria en 1932 con la creación de Azúcar, S.A. (CEFP, 2001). En la década de los sesenta y setenta los ingenios se encontraban endeudados debido a una tecnología obsoleta y una productividad deficiente, produciendo fluctuaciones en sus ingresos, obligando al Estado por la aguda crisis a privatizar esta industria (Sacristan, 2006). Sin embargo esta situación continúa, dando como consecuencia la publicación en el Diario Oficial de la Federación por parte del gobierno federal, una licitación para vender 9 ingenios azucareros a la inversión privada. Tales ingenios generan actualmente el 22% de la producción anual de azúcar en el país, es decir 1.3 millones t (DOF, 2015).

El ingenio Emiliano Zapata en Zacatepec y Cassano en Cuautla, fueron comprados por el Grupo Beta San Miguel y se espera que la zafra 2015- 2016, tenga una nueva orientación, por una parte el sector industrial buscará la incorporación de nuevas tecnologías, como la producción de biocombustibles, así como generar energía eléctrica a partir de la fibra o el bagazo de la caña (ZAFRANET, 2015).

Actualmente la caña de azúcar tiene un alto impacto en la economía nacional, su valor es de 3 mil millones de dólares anuales, lo que representa 11.6 por ciento del total de las materias primas agroindustriales (SIAP, 2010), además representa el 11% del valor del sector primario, 2.5% del Producto Interno Bruto (PIB) manufacturero y 0.4% del PIB nacional (CNIAA, 2010), por lo que genera más de 440 mil empleos directos y beneficios indirectos a más de 2.2 millones de personas (DOF, 2014).



Durante el periodo de 2012/13, en nuestro país se cosecharon 780.3 mil ha que abastecieron a 55 ingenios de 15 estados cañeros (Figura 1) (CANADESUCA, 2012).



Figura 1: Estados en donde se siembra caña de azúcar en México.

## 2.1 Fideicomiso Ingenio Emiliano Zapata en el Estado de Morelos

El Estado de Morelos cuenta con 33 municipios donde Zacatepec de Hidalgo es uno de los principales productores de caña de azúcar. Se encuentra a 910 metros sobre el nivel del mar, posee un clima semi-seco cálido, con invierno poco definido, sequía a fines de otoño e invierno y principios de primavera y con un período de lluvias de junio a octubre, su temperatura media es de 24.2° C y su precipitación pluvial promedio es de 886 milímetros al año. Se encuentra a 42 kilómetros al sur de Cuernavaca y a 125 km de la Ciudad de México. Éste municipio carece de elevaciones ya que se encuentra en un valle (INAFED, 2010).

La historia del municipio de Zacatepec de Hidalgo en el Estado de Morelos, México, ha estado estrechamente ligado a la producción de la caña de azúcar. Durante el periodo de gobierno del presidente Lázaro Cárdenas del Río quien inauguró el 5 de febrero de 1938, en el casco de la antigua hacienda de San Nicolás, las instalaciones de lo que actualmente es el Fideicomiso Ingenio Emiliano Zapata, con el propósito de mejorar las condiciones sociales y económicas de ejidatarios y trabajadores. Hasta mayo de 2015, el ingenio era administrado por el Gobierno Federal con el nombre de Fideicomiso Ingenio Emiliano Zapata ubicado en las siguientes coordenadas: Al norte 18°41', al sur 18°37' de latitud norte; al este 99°11', al oeste 99°14' de longitud oeste (Figura 2). Colinda al norte con los municipios de Puente de Ixtla y Tlaltizapán; al este con los municipios de Tlaltizapán y Jojutla; al sur con el municipio de Jojutla; al oeste con los municipios de Jojutla y Puente de Ixtla. Se conserva como uno de los ingenios con mayor producción de azúcar estándar en el país la cual es exportada a otros países como Estados Unidos y la Unión Europea (Fideicomiso Ingenio Emiliano Zapata, 2014). En la zafra 2013-2014 en el Fideicomiso Ingenio Emiliano Zapata de Zacatepec, se industrializaron 610 mil toneladas de caña (ZAFRANET, 2014).



Figura 2: Fideicomiso Ingenio Emiliano Zapata.

## **2.2 Caña de azúcar, cultivo y cosecha.**

### **2.2.1 La caña de azúcar**

La caña de azúcar es el nombre vulgar de la especie *Saccharum officinarum* L. de la familia de las gramíneas, son plantas herbáceas, muy altas, tallo tipo caña; cilíndrico, sencillo, hueco y macizo en los nudos, donde se insertan las hojas; alternas, dísticas, de lineares a lanceoladas; en su parte inferior se encuentra la vaina, que envuelve el tallo, y en la superior el limbo o lámina, plano o enrollado. En la unión del limbo y la vaina puede haber una lígula membranosa o pelosa, y el limbo puede presentar en su base dos prolongaciones laterales o aurículas. Inflorescencia formada por espiguillas; éstas constan de un raquis sobre el que se insertan 1 o más flores cubiertas por 2 brácteas o glumas situadas en la base de la espiguilla y que cubren las flores más o menos (Aizpuru *et al.*, 1993, Carretero, 2004, Devesa, 1997).

Los orígenes de la caña de azúcar son diversos y difíciles de confirmar, por lo que no se conoce con exactitud de donde proviene, debido a esto se han propuesto muchas teorías acerca de su origen, pero se considera que las zonas de origen del *Saccharum*, es la región que comprende parte de la India, China y Nueva Guinea y zonas aledañas, por encontrarse ahí el mayor número de especies (Subiros, 2000).

Una reseña confirma que el cultivo de la caña inicio en la Isla de Nueva Guinea en el año 3000 A.C, hasta extenderse a Borneo, Sumatra e India, donde se procesó para obtener azúcar (García, 1998) y se continuo expandiendo hasta Persia y posteriormente hacia Europa, en particular, las costas del mediterráneo se convirtieron en terreno ideal para el cultivo de la caña de azúcar (Galloway, 1989).

Con el descubrimiento de América llegó el cultivo a nuestro continente y se expandió por todas las zonas cálidas empezando en la costa Veracruzana. Su producción comenzó a cobrar importancia y se empezó a exportar a Europa. Desde entonces los sembradíos de caña han abundado en las tierras de cultivo, estos son, hasta el momento, uno de los principales medios de subsistencia.

Sin embargo el Estado de Morelos es eminentemente agrícola, siendo uno de sus productos más representativos la caña de azúcar, gramínea que se cultiva, tradicionalmente, en veinte municipios del estado, siendo Tlaltizapán, Tlaquiltenango, Jojutla y Cuautla los mayores productores. Estos cuatro municipios contribuyen con aproximadamente el 60% de la producción total del estado (Longoria, López y Morales, 2014).

### **2.2.2 El cultivo de la caña de azúcar**

La distribución del cultivo está comprendida entre los trópicos de Cáncer y de Capricornio, entre las cuales se encuentran zonas tropicales e intertropicales propicias para el desarrollo del cultivo. El área total en producción es de 19.24 millones de hectáreas distribuidas en Asia 42.5%, América 47.7%, en África 7.4% y Oceanía 2.4% .El promedio mundial de producción es de 65.2 ton/ha (FAOSTAT, 2002). Brasil es de los países que tienen una mayor superficie cultivada con un promedio de 300 mil hectáreas por año entre 2000 y 2007 (GRAIN, 2009).

Existen una gran diversidad de especies y variedades de la caña de azúcar, cuya finalidad es de obtener plantas que desarrollen un mayor rendimiento, así como, una mayor resistencia a las diferentes zonas, climas, enfermedades y plagas donde se cultiva la caña de azúcar. Es un cultivo duradero según variedad y condiciones locales la planta forma entre 4 y 12 tallos que crecen en promedio entre 3-5 m de altura. El contenido de azúcar (sacarosa) oscila entre 11 y 16 %. (SIAP, 2008).

El proceso de cultivo de la caña de azúcar inicia con la preparación de los terrenos donde se ubicara la parcela. Para preparar los suelos es necesario limpiar de toda maleza, combatir plagas, así como remover toda la tierra para que se oxigene. Se surca el terreno con una distancia entre 1 y 1.5 metros por surco y se aprovecha para adicionar abono y herbicidas (Mago, 1986). Se procede a la selección de la semilla y posteriormente a la siembra, surcando de nuevo para hacer canales de riego. La nivelación del terreno es también importante para el manejo y control adecuado del riego y el drenaje, así como de la época de lluvias que es lo más usual en este cultivo.

Entre sus requerimientos se encuentran suelos con pH ácido a la gama neutra, sueltos, arenosos-arcillosos profundos y fértiles. La humedad es un factor muy importante, por lo que respecta al sistema de riego, debe ser adecuado para lograr mejores rendimientos, requiere agua en la cantidad y forma oportuna para alcanzar una buena producción. El riego se aplica hasta dos meses antes de la cosecha, la cual se realiza entre los 6 y 12 meses asegurando una excelente calidad de la caña (Domínguez et al., 2014).

La caña de azúcar es adecuada para el monocultivo y se cosecha después de 14 a 18 meses y el nuevo crecimiento (retoño) después de 12 a 14 meses. Los rendimientos son de 60 a 120 ton / ha; el contenido de azúcar es, en promedio, 12,5%. El contenido de azúcar en la caña disminuye a medida que las poblaciones aumentan de edad, se obtienen buenos resultados de vida útil al no exceder de 4 a 5 cosechas (GTZ/BMZ, 1995).

Las variaciones de temperatura superiores a 8°C son muy importantes en la fase de maduración, porque ayuda a formar y retener la sacarosa. A mayor radiación solar, habrá mayor actividad fotosintética y mayor almacenamiento de los carbohidratos en las hojas al tallo, produciendo mayor tonelaje de azúcar en la fábrica (Subiros, 2000, Romero et al., 2009).

Por otra parte de las necesidades por monocultivos especialmente con una sola especie vegetal (caña de azúcar), requieren de grandes aportaciones de fertilizantes y plaguicidas, estos tienen efectos negativos sobre algunos ciclos de la naturaleza, como es el óxido nítrico, un gas de efecto invernadero con un potencial de calentamiento global unas 300 veces mayor que el dióxido de carbono, es liberado por fertilizantes nitrogenados (FAO, 2008).

Para la entrega de la caña a los ingenios se utilizan dos procesos más: la quema y el transporte. Es práctica común quemar la caña, ya que ahorra tiempo, dinero y esfuerzo, sin embargo, este proceso es el más contaminante y el tema de mayor importancia por el descontento entre la población vecina, la cual ha esperado por años un verdadero cambio.

### 2.2.3 Cosecha y Quema de la caña.

La quema es una técnica antigua que requiere de personal entrenado y con experiencia probada, así como cuidados y controles especiales en cuanto al tiempo, la programación y el levantamiento. Esta tiene el propósito de eliminar follaje innecesario, plagas, roedores y bacterias como la *Leifsonia xyli subsp. Xyli*, que causa la enfermedad de raquitismo afectando el crecimiento de los tallos haciéndolos cortos y delgados (Martín et al., 2001), normalmente se realiza por la noches cuando la temperatura es más baja y hay pocas corrientes de aire. Asimismo, debe hacerse veinticuatro horas antes de la entrega de la caña, ya que si excede este tiempo, la caña entra en proceso de óxido-reducción que deteriora las propiedades del jugo y disminuye el contenido de sacarosa. La mayoría de los productores obtienen aceptables rendimientos que oscilan entre 100 y 120 toneladas por hectárea, como promedio de los diferentes ciclos de cultivo, lo que les permiten mantener el cañaveral por cinco o seis "socas" último retoño de la caña de azúcar (INIFAP, 2000).

La quema de residuos agrícolas constituye una fuente importante de emisión de contaminantes al aire, de compuestos como el metano (CH<sub>4</sub>), monóxido de carbono (CO), bióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), hidrocarburos (NMHC) y partículas menores a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>) (Quintero y Moncada, 2008). La quema de una sola hectárea de plantación de caña significa emitir a la atmósfera más de 160 kg de bióxido y monóxido de carbono (SAGARPA, 2009).

Los inconvenientes derivados de la quema son: reducción de la calidad de la caña debido a deterioros del tejido celular y con ello mayor riesgo de infecciones en los puntos lesionados; destrucción de materia orgánica; empeoramiento de la estructura del suelo, aumento de la erosión del suelo, especialmente en tierras con colinas; contaminación del aire por emisiones de humo y de ceniza volátil, Figura 3 (US EPA, 1997).

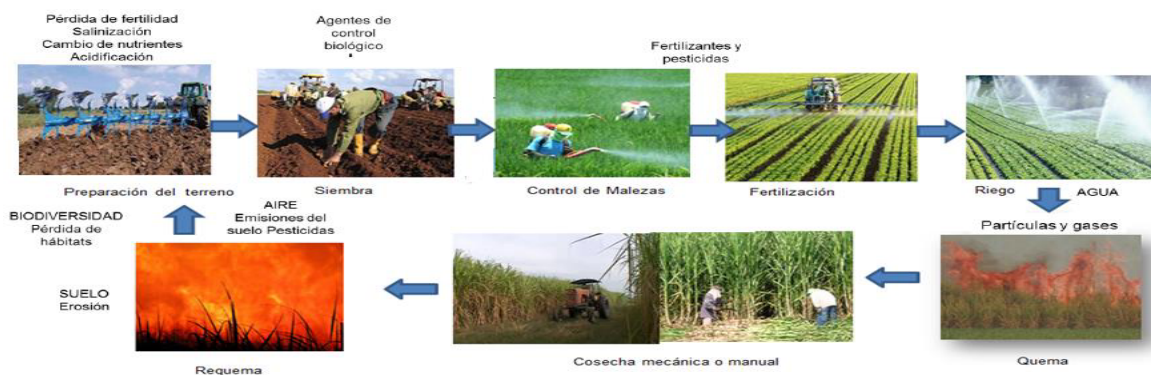


Figura 3: Impactos ambientales a partir del ciclo de cultivo de la caña de azúcar.

Fuente: Elaboración Propia

## **2.2.4 El proceso de producción de la caña de azúcar**

Un término muy importante para la Industria Azucarera es el de la frescura de la caña el cual se define como el tiempo transcurrido desde la quema de la caña antes del corte manual o mecanizado, hasta su entrada en las bandas transportadoras de los Ingenios para su procesamiento. Mientras menor sea el tiempo mayores rendimientos se tendrán al reducir la pérdida de sacarosa (Palacios et al., 2011).

El proceso industrial para la fabricación de azúcar implica la aplicación de distintos procesos para convertir el jugo de caña, en cristales y depurarlos de manera natural de impurezas que pudieran resultar dañinas para el organismo. Durante este proceso de la producción de caña de azúcar (sacarosa) se obtienen otros productos como: melaza, cachaza y bagazo de este último ampliaremos más adelante su uso en el proceso. Este como otros procesos tienen impactos negativos como emisiones, descargas y residuos los cuales se indican en cada etapa (Figura 4).

El proceso de fabricación consta de los siguientes subprocesos:

- Entrada
- Limpieza
- Molienda
- Clarificación y Filtración
- Evaporación
- Cristalización y Centrifugación
- Refinado
- Secado
- Envasado

### **-Entrada**

Los camiones al llegar al Ingenio se colocan en el área de descarga, donde la caña es pesada para llevar un control de las toneladas de caña que ingresan a la planta. Los camiones con caña se colocan en el área de batey donde esperan para descargar la caña.

### **-Limpieza**

La caña se descarga en las mesas alimentadoras y se aplica una limpieza para eliminar la tierra, piedras y basura que es arrastrada de los campos (Viana, 2007). La limpieza en seco consiste en mesas alimentadoras con sistema de vibración que permite sacudir la caña para que la tierra y hojas no deseadas caigan bajo la mesa y sean recolectadas (Domínguez et al, 2011).

### **-Molienda y Extracción**

Las bandas transportan la caña hacia cuchillas rotatorias que se encargan de cortar los tallos en pedazos pequeños y desfibradoras o molinos de martillos que desmenuzan la caña pero no extraen jugo. En la etapa de molienda se extrae el jugo de la caña a través de un conjunto de molinos de 3, 4 o hasta 6 mazas y se agrega agua caliente para obtener la máxima cantidad de sacarosa en un proceso llamado maceración. En esta

etapa se obtiene el jugo mezclado y un residuo sólido fibroso llamado bagazo que se utiliza como combustible para generar energía (GTZ/BMZ, 1995).

Las emisiones a la atmósfera que se generan durante la etapa de molienda corresponden a humo, los gases de combustión en las calderas, partículas de carbón y las partículas de bagazo. Los gases de combustión contienen principalmente CO<sub>2</sub> y otros gases que contribuyen de manera activa al efecto invernadero, por consiguiente al calentamiento global y a otros fenómenos como la lluvia ácida (Morales, 2011).

### **-Clarificación y Filtración:**

El proceso de clarificación o purificación, diseñado para remover las impurezas tanto solubles como insolubles, emplea cal y calor. La cal se adiciona en forma de lechada de cal (Ca O y H<sub>2</sub>O), en cantidades de alrededor de 0.5 kg Ca O/t caña, su función es neutralizar la acidez del jugo, formando sales insolubles de calcio, generalmente fosfatos de calcio. Posteriormente este pasa por un calentamiento ya alcalinizado hasta temperatura de ebullición y sirve para coagular la alúmina, y precipitar sólidos suspendidos (Chen y Chou, 1993), finalmente se filtra y el decantado va directamente a la estación de evaporación.

Durante la etapa de decantación del jugo de caña se generan lodos. Para recuperar el jugo de estos lodos, se agrega bagacillo, se regula el pH con adición de cal, y se realiza una filtración al vacío. La torta de sólidos generada es la cachaza. La descomposición de la cachaza también contribuye con la emisión de gases como el CO<sub>2</sub> y el metano, aparte de tener un olor muy desagradable. Es fuente de criadero de moscas y combustiona espontáneamente en estado seco al estar expuesta al sol (Morales, 2011). Si no se trata antes de adicionarla como fertilizante para el suelo ocasiona retraso en el crecimiento de los cultivos cuando es incorporada en el momento de la siembra (Dominguez et al., 2011).

### **-Evaporación**

El jugo claro se concentra continuamente por múltiples etapas de evaporación hasta que tiene un contenido seco de 60 a 70%, cada etapa de este proceso se calienta con el vapor de la etapa anterior. En el proceso de ebullición, más agua se elimina del zumo concentrado (jarabe) en calderas que operan a un aprox. 80% de vacío. El jugo se hierve a una temperatura más baja de lo normal debido a la baja presión en el equipo, evitando así cualquier decoloración debido a la caramelización (GTZ/BMZ, 1995).

En la evaporación se elimina agua en forma de vapor y posteriormente esta se condensa, dichos condensados en ocasiones llevan consigo arrastres de azúcar, lo que representa una contaminación, por la demanda bioquímica de oxígeno. Además de los condensados, también se desechan aguas de lavados de los evaporadores y calentadores, en los cuales se utilizan ácido clorhídrico y sosa cáustica para su limpieza (Morales, 2011).

### **-Cristalización y Centrifugación**

La cristalización comienza con un proceso de ebullición que al completarse, la masa hervida, se drena de las tachas en cristalizadores, que mediante condiciones controladas así como la adición de jarabe y la eliminación de agua, hasta obtener la cantidad y tamaño de cristales. A medida que la masa cocida se enfría constantemente, los cambios

de sobresaturación, provocan que los cristales de azúcar se formen de nuevo. La masa cocida se transfiere a continuación a partir de los cristalizadores en centrifugadoras, en el que el cristalizado se separa del jarabe, dejando atrás el azúcar en bruto de color marrón amarillento este es conocido como melaza (GTZ/BMZ, 1995).

Otro desecho de la etapa de cristalización son las aguas de los condensados del vapor que se genera al evaporar el jarabe en los tachos. Este generalmente tiene un bajo contenido de DBO y representa un volumen considerable, mientras que los residuos concentrados son generalmente de pequeño volumen pero un elevado contenido de materia orgánica (Morales, 2011).

### -Refinación

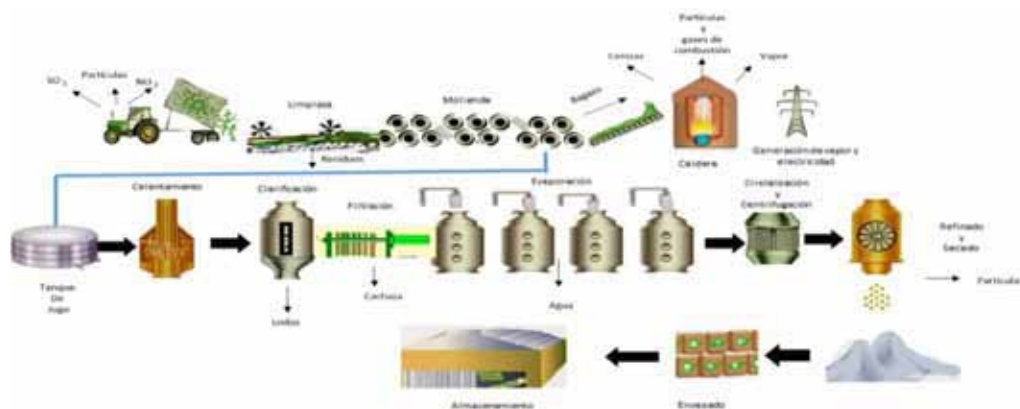
El objetivo de la refinación es eliminar las impurezas de los cristales de azúcar. A través de una tecnología de uso intensivo de la planta, el azúcar en bruto y azúcar blanco de mala calidad se disuelven, y luego se decolora y se filtra por la adición de carbón activado o resinas de intercambio iónico (GTZ/BMZ, 1995).

### -Secado

Se utiliza un proceso de secado fluidizado a una temperatura de 110 °C, posteriormente se enfría y se transfiere a contenedores de embalaje y luego es enviado a almacenamiento a granel (EPA, 2010).

### -Envasado

De los molinos, los cristales de azúcar blancos secos son mecánicamente separados por el tamaño de las partículas usando una pendiente, girando la pantalla de malla de alambre o placa perforada. Después de la detección, el terminado, azúcar granulada refinada se envía a los contenedores de acondicionamiento y, a continuación, a recipientes de almacenamiento antes de su embalaje o a granel. Regularmente todo el azúcar es empaquetado ya sea envases de papel multicapa, cajas de cartón o bolsas de polietileno y otra parte se carga a granel en camiones que la transportan al puerto de embarque (Chen & Chou, 1993).



**Figura 4: Impactos Ambientales derivados del proceso de elaboración de azúcar a partir de la caña de azúcar.**

Fuente: Elaboración propia

### 2.2.5 Caldera

Las calderas o generadores de vapor son conocidas como el corazón de la fábrica, son instalaciones industriales que a partir de un combustible sólido, líquido o gaseoso, vaporizan o calientan el agua para diferentes usos industriales. Las calderas bagaceras son un tipo de calderas que pueden utilizar el bagazo de la caña de azúcar como combustible para la generación de vapor para el proceso (USEPA, 1997), necesario para los turbogeneradores y para diversas operaciones en la producción como: evaporación, cristalización, centrifugación y secado (Dominguez et al., 2011).

El bagazo contiene trazas de hidrógeno, nitrógeno, azufre, ceniza y agua, dependiendo de la humedad relativa. Cuando ésta se quema, se efectúa una reacción química que combina el carbono con oxígeno del ambiente, formándose dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y combinando el hidrógeno con oxígeno para formar vapor de agua. Sin embargo cuando la combustión no es completa, se forman monóxido de carbono (CO), Hidrocarburos,  $\text{N}_2\text{O}$  y otros contaminantes, contribuyendo al efecto invernadero. (BUN-CA, 2002).

Como se ha mencionado al igual que la quema de caña, las emisiones de gases a la atmósfera en el proceso, también contribuye a un gran impacto ambiental ofrecido por la quema de combustibles fósiles como es el petróleo y gas natural, por lo que se utiliza el bagazo como alternativa de estos, mientras tanto este sigue teniendo inconvenientes como combustible, ya que los gases de combustión de bagazo no contienen sustancias tóxicas pero generan partículas (GTZ/BMZ, 1995).



## **Capítulo 3. Impactos al medio ambiente y a la salud por el proceso de la caña**

### **3.1 Impactos al medio ambiente**

A partir de la revolución industrial el medio ambiente no solo se ha visto afectado por la extracción de recursos naturales, sino también por las descargas de contaminantes en cuerpos de agua, suelo y aire. Hace décadas las industrias no tomaban en cuenta el impacto que generaban por la producción de sus productos para la sociedad. Sin embargo a través de la legislación han propuesto normas cada día más exigentes para que la industria tome medidas de control de sus emisiones, descargas y residuos.

La contaminación del aire causa el incremento de enfermedades respiratorias, irritación en ojos, decrementos de la visibilidad, daños a plantas y animales, un caso puntual es el derivado de ingenios azucareros, donde se presentan efluentes fisicoquímicos y biológicos. De aquí surge la necesidad de conocer el grado de afectación, al ambiente y a la salud por esta industria (Saranraj & Stella, 2014).

En nuestro país Morales (2011) menciona que el impacto ocasionado por los ingenios azucareros en la zona centro del estado de Veracruz provoca afectaciones al medio ambiente como la mortandad de seres vivos por sus diversas emisiones de contaminantes.

La industria azucarera genera impactos ambientales no solo por sus procesos industriales, sino también desde el campo a partir del cultivo provocando impactos a la biodiversidad, al agua, suelo y aire (Cheesman, 2004).

#### **Impactos ambientales sobre la biodiversidad:**

El desmonte elimina toda la vegetación, se realiza mediante la tala y quema, esto no solo produce la pérdida directa de las especies y los hábitats, sino también en una serie de impactos sobre la función de los ecosistemas, ya que se modifican el nivel de nutrientes y la compactación del suelo, incrementando la erosión del suelo, y produciendo también cambios hidrológicos (Viglizzo *et al.*, 2003).

El uso de plaguicidas puede tener un impacto directo en la biodiversidad si no es selectivo a la plaga que se quiere atacar; sin embargo, también puede tener efectos indirectos, como la eliminación de especies que proveen alimento o protección a otros organismos. Asimismo, un control biológico inadecuado en el cultivo de caña puede tener impactos negativos en la biodiversidad (Cheesman, 2004).

#### **Impactos ambientales en la calidad del agua:**

Los altos consumos de agua para el riego de la caña, así como el uso indiscriminado de agroquímicos pueden llegar a contaminar los cuerpos de agua y afectar especies acuáticas; las aguas subterráneas pueden verse afectadas por la lixiviación de nutrientes provenientes de fertilizantes aplicados a los cultivos (Cheesman, 2004).

### **Impactos ambientales en el suelo:**

En muchas áreas, la caña es cultivada en pendientes, lo cual agrava los riesgos de erosión. Las pérdidas por erosión del suelo debido al cultivo de caña de azúcar se estiman entre 15 a 500 t ha<sup>-1</sup> por año (Cheesman, 2004).

Además de la erosión, el suelo es removido durante la cosecha de la caña. La materia extraña (incluyendo suelo) que llega a molinos oscila entre 1-15% (Cheesman, 2004); sin embargo también varía si el corte es manual o mecánico.

La reducción de la calidad del suelo se ve afectada por la compactación del suelo, lo que provoca el aumento de la densidad aparente y reducción de la porosidad y consecuentemente reducción de la velocidad de infiltración del agua. Otros impactos en la calidad del suelo son provocados por la pérdida de materia orgánica, cambio en los niveles de los nutrientes, salinización y acidificación como consecuencia de la aplicación de fertilizantes inorgánicos (Cheesman, 2004).

La quema de caña tiene un gran impacto hacia el suelo ya que a la hora de la cosecha, la caña es quemada y dentro de los elementos afectados se encuentra el suelo por la pérdida de fertilidad, ya que la quema hace que se pierda materia orgánica y microorganismos que le sirven de protección lo que provoca su esterilización o erosión (Morales, 2011).

### **Impactos ambientales en la calidad del aire:**

Ripoli (2000) indica que al quemar la caña de azúcar, se presentan una serie de problemas ambientales como es la contaminación del aire aumentando los índices de emisiones de gases a la atmósfera provocando efecto invernadero, de igual manera la ceniza y el humo generado afecta a los animales, a la vez que contamina ríos y lagos cercanos a la quema. Dicha ceniza y humo producen dificultades en la visibilidad, lo que se torna sumamente peligroso en el caso de carreteras o aeropuertos cercanos al lugar de la quema. Esta ceniza es conocida como tizne y se desplaza según la velocidad del viento. Mientras mayor sea la variabilidad de la dirección del viento, menor es la distancia frontal que recorre el tizne desde el sitio de la quema (Chaves, 2003).

### **Impactos ambientales por la quema de caña:**

La práctica de quema previa a la cosecha genera contaminación del aire, además de contribuir a los impactos sobre el suelo, ya que los suelos pierden los microorganismos. El uso de fertilizantes exacerba las emisiones nitrogenadas de los campos. Al sureste de Brasil, la mayoría de los incendios se generan en los campos agrícolas, especialmente los cultivos de caña de azúcar, en el que 20 Ton / ha se queman cada año para facilitar la cosecha (Lara et al. 2001).

En lo que respecta a la contaminación atmosférica, Molina (1998) menciona que la quema de la caña de azúcar antes y después de la cosecha, se encuentra junto a otros factores como causa del deterioro de la calidad del aire. La adopción de la quema antes de la cosecha para facilitar este trabajo y de la requema de los residuos para facilitar las labores pos cosecha, genera un impacto ambiental negativo sobre todo en las poblaciones asentadas alrededor de las áreas de cultivo de la caña de azúcar.

Se estima que la quema de biomasa, como madera, hojas, árboles y pastos, residuos agrícolas, produce 40% del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), 32% del monóxido de carbono (CO), 20% de partículas de materia suspendidas (PM) y 50% de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HPA) emitidos al ambiente a escala mundial (Kambis y Levine, 1996).

Las quemas de residuos agrícolas son muy utilizadas a pesar de que no se trata de un manejo ambientalmente aceptable. (Lemieux et al., 2004) mencionan una serie de razones que desde el punto de vista de la salud pública resultan preocupantes:

- El humo de las quemas agrícolas se libera a nivel o muy cerca del suelo en áreas generalmente pobladas, lo que conlleva una exposición a los contaminantes directa y elevada de la población aledaña.
- Estas quemas se realizan generalmente por etapas, en temporadas específicas del año, y pueden dar lugar a concentraciones muy elevadas de contaminantes.
- Son fuentes no puntuales de contaminantes atmosféricos y se realizan en áreas muy extensas, por lo que resulta difícil medir y regular este tipo de emisiones.
- Las condiciones de la combustión y los combustibles varían e incluyen la posible presencia de plaguicidas.
- Contribuyen al cambio climático, ya que entre los compuestos emitidos se encuentran gases de efecto invernadero y contaminantes climáticos de vida corta, como el carbono negro.
- Afectan la visibilidad en zonas y carreteras aledañas.

En la Figura 5 se presentan los impactos derivados del proceso del cultivo al campo:



**Figura 5: Diagrama de impactos derivados del proceso de cultivo al campo**

Fuente: Adaptado (Cheesman, 2004)

## **Impactos ambientales originados por el proceso de producción de azúcar**

### **Impactos ambientales sobre la biodiversidad:**

La industria azucarera es uno de los sectores industriales que consumen grandes cantidades de agua y en cuanto a su descarga el de contenido de materia orgánica en sus aguas residuales es del 28%, seguido de la industria petrolera (19%) y la agropecuaria (17%) (SEMARNAT, 2008). Otro impacto proveniente de sus descargas son las altas temperaturas y estas al ser vertidas en cuerpos de agua o al suelo ocasionan infertilidad, muerte de microorganismos benéficos (Morales, 2011).

### **Impactos ambientales en suelo:**

Los suelos pueden ser afectados por la mala gestión de los residuos o subproductos como la cachaza, ceniza, vinazas y el riego con aguas residuales (Cheesman, 2004). No obstante, la buena gestión de los sub-productos puede tener beneficios en el campo, como mejoradores de suelo si son apropiadamente aplicados.

Los impactos ambientales del procesamiento de la caña de azúcar sobre la biodiversidad son efectos secundarios provocados por la contaminación ambiental, como la descarga de agua residual en ríos (Cheesman, 2004).

### **Impactos ambientales en el agua:**

Los altos consumos de agua para el riego de la caña, así como el uso indiscriminado de agroquímicos pueden llegar a contaminar los cuerpos de agua y afectar especies acuáticas; las aguas subterráneas pueden verse afectadas por la lixiviación de nutrientes provenientes de fertilizantes aplicados a los cultivos (Cheesman, 2004).

### **Impactos ambientales en la calidad del aire:**

En cuanto a las emisiones a la atmósfera la industria azucarera contribuye de forma importante, a nivel nacional según el Inventario Nacional de Emisiones de 1999 (INE, 2006) para el cálculo de emisiones de partículas de proceso de ingenios azucareros, se usaron factores de emisión AP-42 y las emisiones generadas por la combustión del bagazo se incluyeron en la categoría de fuentes fijas.

Las emisiones atmosféricas provenientes de las calderas son humos y partículas, gases de combustión de los procesos industriales principalmente por la combustión de biomasa; además, durante la purificación del jugo y de su concentración se generan compuestos orgánicos volátiles (COV). En las reacciones bioquímicas de los componentes orgánicos de las aguas residuales en los estanques estratificados se emite amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) y ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) (US EPA, 1997).

### **Residuos sólidos:**

Los residuos sólidos generados durante el procesamiento de caña de azúcar son: tierra, restos de plantas, bagazo, cachaza, ceniza y lodos de filtros, entre otros.

Los materiales residuales pueden ser reutilizados como subproductos: Esta práctica reduce las salidas absolutas del material residual y tiene el potencial de aminorar los impactos negativos de otras actividades ya que pueden prevenir o sustituir otras actividades que provocan daños mayores (Domínguez, 2012).

La cachaza y ceniza puede ser incorporada al campo como fertilizante orgánico, la melaza comercializada y el bagazo puede utilizarse como materia prima principal para la generación de energía (Domínguez, 2012). En la Figura 6 se presentan los impactos generados por el proceso de producción de azúcar.



Figura 6: Impactos al ambiente generados por el proceso de producción de azúcar

Fuente: Adaptado de (Cheesman, 2004)

### 3.1.1 Emisiones de gases de efecto invernadero y sus implicaciones en el cambio climático.

Al enfocarnos en las actividades humanas, tenemos como consecuencia, que al utilizar combustibles fósiles en distintas actividades industriales, se generan gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera que provocan la retención de la radiación infrarroja, lo cual acrecentó el efecto invernadero, un fenómeno natural que ha operado en la Tierra por millones de años, pero que en los últimos decenios se ha establecido que las actividades antropogénicas, incluyendo la quema de combustibles fósiles, el cambio de uso de la tierra y la agricultura lo han agudizado (IPCC,2007) (Lengosa, 2007).

A mediados de la década de 1990, la comunidad científica internacional llegó a un amplio consenso sobre los denominados gases de efecto invernadero (GEI) como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), y fluorocarbonos (CFC);su proporción en la atmósfera se observa en la Figura 7.

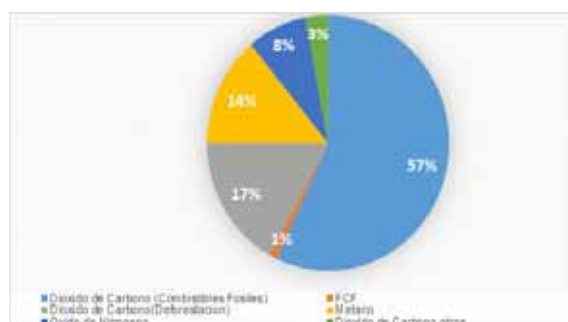


Figura 7: Proporción de gases efecto invernadero Fuente: IPCC, 2007

Los gases de efecto invernadero, se han convertido en un tema importante al ser relacionados con el cambio climático que se refiere a la tendencia de la temperatura del planeta a incrementarse, atribuida al efecto de la contaminación humana, en particular a la quema de combustibles fósiles como el carbón y el petróleo y a la tala de bosques. Las afectaciones del Cambio Climático, incluyen las variaciones del clima que han ocurrido durante la historia del planeta (4 000 millones de años) y que están asociadas a factores como cambios en la actividad solar, en la circulación oceánica, en la actividad volcánica o geológica, en la composición de la atmósfera (Caballero et al., 2007).

La alteración de la concentración de los gases de efecto invernadero ocasionan un forzamiento radiativo, este fenómeno se entiende como aquel cambio en el balance entre la radiación solar que entra y la radiación infrarroja que sale de la Tierra (se expresa en Watts por metro cuadrado,  $Wm^{-2}$ ), ha alcanzado el valor de 2.43  $Wm^{-2}$  a 1.46  $Wm^{-2}$  debido al  $CO_2$ ; 0.48  $Wm^{-2}$  debido al  $CH_4$ ; 0.34  $Wm^{-2}$  debido a los halocarbonos, y 0.15  $Wm^{-2}$  debido al  $N_2O$ , como se muestra en la Figura 8 (IPCC 2001).

Un total de aproximadamente 6 000 millones de t de carbono se lanzan cada año (1t de carbono produce 3.66 t de  $CO_2$ ); y del orden de 3 000 millones de t permanecen y se acumulan en el aire. Los efectos producidos por la presencia de gases con efecto invernadero, dióxido de carbono, en particular, en el sistema climático se han estudiado y están contenidas en las conclusiones del Segundo Informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2007), formados por un importante grupo de investigación científica establecida para definir el alcance del fenómeno y elaborar posibles estrategias para combatirla.

El cambio climático impactará de manera diferenciada a las diferentes regiones del mundo, a los grupos etarios y socioeconómicos (Nicholls *et al.*, 2007) y hasta los géneros (Tranter, 2008), acentuándose las inequidades en salud, estado social y acceso a alimentos adecuados, servicios básicos y otros recursos. El ascenso de la temperatura del aire está ocasionando en los glaciares de montaña, la reducción de la cubierta de nieve, la fusión más temprana del hielo de ríos y lagos en primavera, las modificaciones en los patrones hídricos, la disminución de la biodiversidad, la alteración de ecosistemas terrestres y acuáticos, la afectación a la salud y en la tasa acelerada de aumento del nivel del mar, detectada durante el siglo XX (Magrin et al., 2007; Olivo, 2009).

La industrialización agrícola de las últimas décadas tiene importantes implicaciones para el clima. El IPCC, estima que la agricultura es responsable de cerca del 14% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI). Este 14%, sin embargo, no incluye las denominadas emisiones indirectas de la agricultura, como la energía gastada en la fabricación de fertilizantes, ni en la producción y utilización de maquinaria agrícola, ni en el transporte (de insumos y cosechas), que se incluyen en los apartados de industria, energía y transporte (IPCC, 2008).

En cuanto a las emisiones a la atmósfera la industria azucarera contribuye de forma importante, a nivel nacional según el Inventario Nacional de Emisiones de 1999 (INE, 2006). Para el cálculo de emisiones de partículas de proceso de ingenios azucareros, se usaron factores de emisión AP-42 y las emisiones generadas por la combustión del bagazo se incluyeron en la categoría de fuentes fijas.

El contenido de  $CO_2$  en la atmósfera se ha incrementado con relación a los años anteriores, como resultado de la quema de los combustibles fósiles, la deforestación y la

quemado de residuos vegetales. (Dixon, 1996). Dentro de estas consideraciones, la caña de azúcar con el manejo convencional está contribuyendo al efecto de invernadero.

Los contaminantes de vida corta ya sean en composición de gas o de partículas tienen un efecto sobre el cambio climático, aunque estos tienen una vida más corta en la atmósfera que el dióxido de carbono, a menudo persiste durante sólo unos días o semanas, algunos ejemplos importantes incluyen el carbono negro, el metano, el ozono, y los hidrofluorocarbonos. Algunos CVC son contaminantes atmosféricos nocivos (WHO, 2015).



Figura 8: Diagrama de Efecto invernadero Fuente Modificación UNEP-GRID-Arendal.

En el estado de Morelos, de acuerdo al Inventario de Emisiones a la Atmósfera del Estado de Morelos 2004, los contaminantes que presentaron la mayor cantidad de emisiones fueron dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y partículas menores a 10 micrómetros ( $\text{PM}_{10}$ ), siendo la industria de cemento y cal, y la industria alimentaria las que contribuyeron con el mayor porcentaje (CEAMA, 2007).

En la Figura 9 se presenta los principales gases de efecto invernadero, derivados del proceso de caña de azúcar:

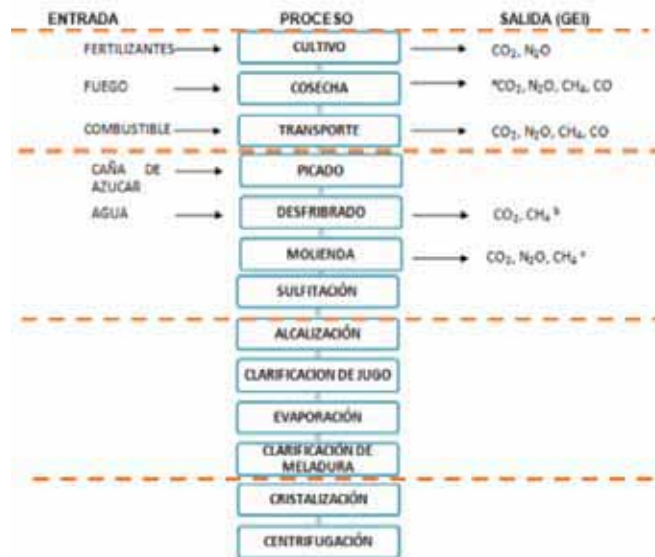


Figura 9: Diagrama de bloques en términos de GEI por proceso de caña de azúcar.

Fuente: Adaptado Bohórquez y Lugo, 2010

### 3.1.2 Emisiones de partículas atmosféricas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>

Las partículas atmosféricas se forman por diferentes fuentes de origen natural y antropogénico, como antropogénico tenemos: la quema de madera, carbón, petróleo y combustibles gaseosos, procesos industriales y combustión vehicular y los de origen natural como: incendios forestales y las erupciones volcánicas (Molina et al., 2004).

Respecto a los mecanismos de formación, las partículas pueden ser emitidas como tales a la atmósfera (primarias), como el polvo en suspensión o partículas emitidas por una chimenea, mientras las secundarias son formadas en la atmósfera por transformaciones de las emisiones gaseosas como los óxidos de azufre, nitrógeno y los compuestos orgánicos volátiles (Pilinis y Seinfeld, 1987).

Dentro de las partículas secundarias se encuentran las derivadas de la quema de caña, si consideramos que la quema de biomasa en el mundo genera una importante emisión de partículas (PM) en el orden de 104 t año<sup>-1</sup> (Zamperlini et al., 1997).

Las partículas se encuentran en estado sólido y líquido, en suspensión en la atmósfera y cuyos tamaños oscilan entre  $2 \times 10^{-4}$  y  $5 \times 10^2$   $\mu\text{m}$ . Debido a que son de diferente tamaño y forma, se han clasificado en términos de diámetro aerodinámico. De acuerdo a su diámetro, se agrupan en finas y gruesas. Las partículas finas son las de diámetro aerodinámico menor o igual a 2,5  $\mu\text{m}$ , denominadas como PM<sub>2.5</sub>. Otro grupo de partículas está constituido por aquellas cuyo diámetro aerodinámico se centra alrededor de las 10  $\mu\text{m}$ , las cuales se denominan PM<sub>10</sub>. Además, dentro de la clasificación se tienen las partículas suspendidas totales, o PST, que se refiere a todas las partículas suspendidas en el aire, en un determinado volumen de aire (Sbarato, 2007).

La caracterización de las partículas reporta una mezcla compleja de compuestos orgánicos, inorgánicos y biológicos tales como metales, sales, material carbonáceo, compuestos orgánicos volátiles (COV), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HPA), endotoxinas que pueden interactuar y potencialmente absorberse como un núcleo de condensación (Alfaro-Moreno et al., 2002.); (Schlesinger et al., 2006); (Soukup & Becker, 2001) La composición elemental de las partículas incluye diferentes elementos, unos livianos como el aluminio, silicio, potasio, calcio, y otros pesados como hierro, zinc, vanadio, titanio, cadmio, plomo, mercurio y antimonio además compuestos orgánicos de elevada toxicidad y potencial efecto cancerígeno y muta génico (Chong., et al 2002).

La contaminación atmosférica por partículas afecta negativamente la calidad del aire y la salud de las personas. La presencia en la atmósfera de este contaminante ocasiona variedad de impactos a la vegetación, materiales y el hombre, entre ellos, la disminución visual en la atmósfera, causada por la absorción y dispersión de la luz (Chen, Ying & Kleeman, 2009). Además, la presencia de partículas está asociada con el incremento del riesgo de muerte por causas cardiopulmonares en muestras de adultos (Pope, 2004).

Entre más pequeñas sean las partículas pueden penetrar directamente hasta el interior de los pulmones con posibles efectos tóxicos debido a sus inherentes características fisicoquímicas.

Actualmente, el término contaminante criterio ha sido adoptado en muchos países (Sbarato, 2007). Las partículas son llamadas contaminantes criterio, por ser objeto de evaluaciones publicadas en documentos de calidad del aire en los Estados Unidos, con el



objetivo de establecer concentraciones para los contaminantes como niveles permisibles que protejan la salud, el medio ambiente y el bienestar de la población.

En México, recientemente se ha modificado el criterio para evaluar la calidad del aire con respecto a partículas ( $PM_{10}$ ) menores de 10 micras y  $PM_{2.5}$  menores de 2.5 micras ( $PM_{2.5}$ ) reemplazando la norma oficial mexicana de calidad del aire NOM-025-SSA1-1993 por la NOM-025-SSA1-2014 que establece los valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas  $PM_{10}$  ( $75 \mu\text{g m}^{-3}$ , promedio 24 h.) y  $PM_{2.5}$  ( $45 \mu\text{g m}^{-3}$ , promedio 24 h.) en el aire ambiente y los criterios para su evaluación.

### 3.1.3 Carbono negro y carbono orgánico

La Materia Orgánica (MO) puede ser primaria o secundaria, es originada por la última parte de la oxidación de compuestos orgánicos volátiles. A su vez, el material orgánico en la atmósfera puede ser biogénico o antropogénico. La materia orgánica influye en el campo de radiación-atmósfera tanto por dispersión y absorción. Otro tipo de aerosol importante es el Carbono Elemental (CE). La materia orgánica y el carbono elemental en conjunto constituyen la fracción carbonosa de los aerosoles. Las especies carbonáceas se presentan en tres formas: Carbono Elemental, Carbono Orgánico y Carbonato (este último es ignorado por sus mínimos valores), de los cuales los dos primeros constituyen el 10 % y 70% de las partículas. La sumatoria de estos tres componentes es el carbono total (CT) (Fujita, 2007). En la Figura 10 se presenta la composición química de los aerosoles.

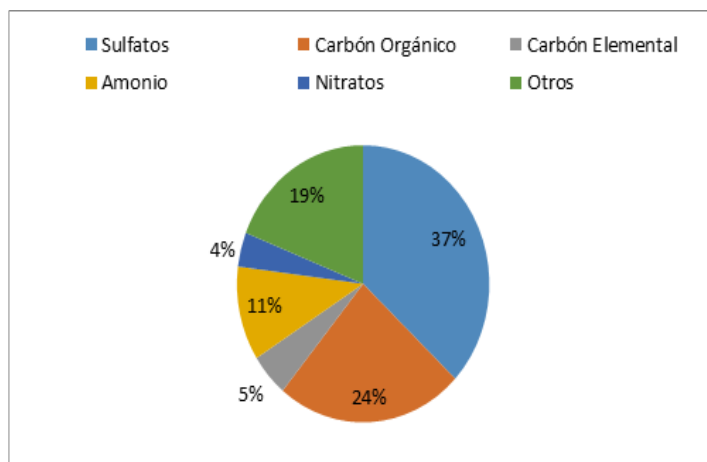
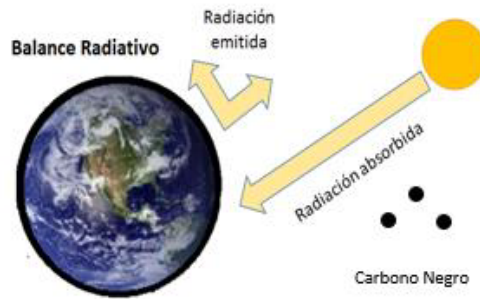


Figura 10: Composición Química de los Aerosoles Fuente: Jacob, 1999.

El Carbono Negro (CN), es un componente de las partículas finas o aerosoles ( $PM_{2.5}$ ) (Kumar *et al.*, 2011). A diferencia de los gases de efecto invernadero, existe como un conjunto de partículas en estado sólido-líquido-gaseoso de composición variada (Bachmann,2009).El CN es un Forzador Climático de Vida Corta que en los últimos años ha tomado importancia, ya que modifica el balance radiativo del planeta, el cual está ligado al calentamiento global, debido a la gran capacidad que este tiene de absorber y disipar la radiación solar e infrarroja (Jacobson,2000),lo que ocasiona un aumento en la temperatura global, ya que la radiación infrarroja que sale es menor a la radiación solar que entra (IPCC,1990).Mediante este efecto, el carbono negro es responsable de  $0.34 \text{ W m}^{-2}$  de forzamiento radiativo promedio a nivel mundial, de los cuales  $0.22 \text{ W m}^{-2}$  se deben al uso de combustibles fósiles y  $0.12 \text{ W m}^{-2}$  a la quema de biomasa y otras fuentes (IGSD, 2009). La cual provoca el calentamiento en la atmósfera,

y que puede afectar formando nubes y precipitaciones a nivel regional (Figura 11) (C2ES, 2010).



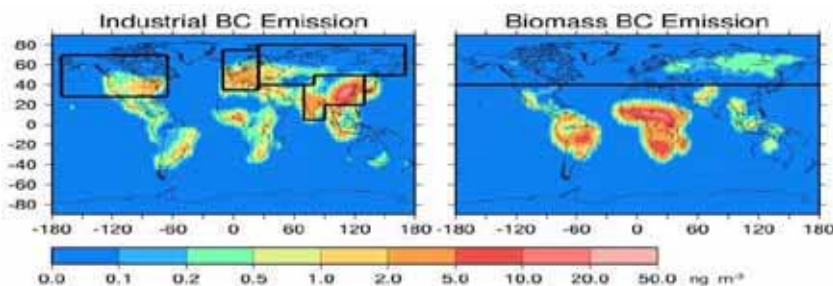
**Figura 11: Balance radiativo del planeta por la presencia de aerosoles de carbono negro.**

Después del CO<sub>2</sub> este aerosol es el principal causante del calentamiento global con una aportación del 40% (Baron *et al.*,2009), aunado a que un gramo de CN contribuye 2000 veces más al calentamiento global que el CO<sub>2</sub> en un periodo de 20 años, por lo tanto, disminuir la emisión de una tonelada de CN equivaldría a la reducción de 2 200 toneladas de CO<sub>2</sub> eq (20 años GWP) y 680 toneladas de CO<sub>2</sub>eq (100 años GWP),(Figura12) (Bond and Sun,2005).



**Figura 12: Proyección satelital de Carbono negro.**  
Fuente: Nasa

El carbono negro se forma a partir de la combustión incompleta de combustibles fósiles (petróleo, carbón mineral y gas natural), y de la biomasa (vegetación, leña, subproductos de cosechas, etcétera), se emite en forma de hollín antropogénico y natural. En la Figura 13 se aprecia a través de una proyección satelital el impacto por la emisión de carbono debido a la industria y por quema de biomasa.



**Figura 13: Proyección satelital emisión Industrial y por Biomasa de Carbono negro**  
Fuente: Nasa

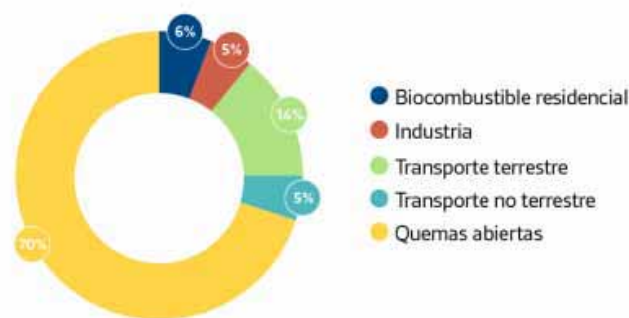
Se calcula que en el mundo 40 % del carbono negro proviene de la quema de combustibles fósiles, 20 % por los biocombustibles y 40 % por la biomasa (SMAGEM ,2010) .Asimismo, el carbono negro ha adquirido especial atención debido a su amplio rango de traslado, a su participación en la formación de contaminantes secundarios, pero sobre todo, a sus efectos en la salud humana. Las partículas carbonosas ultra finas pueden llegar a lo más profundo del sistema respiratorio y causar enfermedades e infecciones respiratorias, e incluso decesos y cáncer.

El carbono orgánico y el carbono elemental contenido en partículas PM<sub>10</sub>, afecta a la salud y al ambiente por lo que es importante determinar su concentración y sus fuentes de emisión más importantes y así poder establecer políticas ambientales y de sanidad, así como medidas de mitigación al impacto ambiental .

Recientemente el (IPCC, 2013) reportó el valor del forzamiento radiativo de la quema de biomasa en aerosoles de partículas como  $-0,2 \text{ W m}^{-2}$  .

Otra característica es su duración puesto que solo permanece en la atmósfera 1 a 4 semanas, por lo que sus impactos son regionales.

En Latinoamérica se estima que al año se emiten 1 300 000 t año<sup>-1</sup> de carbono negro, las cuales en su mayoría (70%) se deben a las quemaduras abiertas de biomasa, principalmente por incendios forestales y la combustión de residuos agrícolas( Figura 14) (AIDA, 2009).



**Figura 14: Fuentes latinoamericanas de carbono negro según el sector de emisión.**

Fuente: Figura modificada de AIDA, 2009.

Aproximadamente 250 000 toneladas de carbono negro son emitidos de la quema de biomasa en Estados Unidos, lo que representa el 39% de sus emisiones totales de carbono negro. De acuerdo a la EPA los inventarios de emisión de las partículas carbonáceas se realizan en función de las PM<sub>2.5</sub>, ya que en ellas se encuentra la mayor cantidad de estas partículas (EPA, 2012) (Tabla 1).

**Tabla 1: Emisiones por quema de biomasa Estados Unidos**

Fuente	PM <sub>2.5</sub> (t año <sup>-1</sup> )	BC(t año <sup>-1</sup> )	OC(t año <sup>-1</sup> )	OC/BC	BC/ PM <sub>2.5</sub>
Quema de Biomasa	2 266 513	224 608	1 058 494	4.7	0.10

Fuente: U.S. EPA 2013

### **3.2 Efectos a la salud por la cosecha y el proceso industrial de la caña.**

La contaminación atmosférica constituye un riesgo para la salud y se estima que causa alrededor de dos millones de muertes prematuras al año en todo el mundo. Cuanto menor sea la contaminación atmosférica de una ciudad, mejor será la salud respiratoria (a corto y largo plazo) y cardiovascular de su población (OMS, 2011).

Los contaminantes producidos por las industrias dependen fundamentalmente del tipo de proceso de producción empleado, de la tecnología utilizada y de las materias primas usadas. Las actividades industriales producen contaminantes atmosféricos muy variados, entre los contaminantes más comunes destacan: Partículas, SO<sub>x</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, fluoruros, óxidos de hierro, ácido nítrico, sulfúrico y fosfórico.

Entre los contaminantes emitidos, las partículas son de especial preocupación, ya que las personas que habitan a los alrededores de las fuentes de emisión en este caso el Ingenio, están expuestas diariamente a altas concentraciones que provocan una situación ambiental insostenible por su contenido de humo, polvo, tizne y hollín, lo que provoca graves irritaciones oculares; problemas en las vías respiratorias, con consecuencias como enfisema pulmonar, alergias de la piel, congestión nasal y sangrado repentino de las fosas nasales (Mugica et al., 2015).

Es una realidad que en los 57 Ingenios ubicados en 15 estados de México, sus maquinarias son obsoletas, equipos de más de 50 y 70 años, con calderas adaptadas para utilizar a discreción el mismo combustóleo, bagazo lleno de humedad que provoca una pesada contaminación del aire. como claro ejemplo el ingenio Emiliano Zapata en Morelos, se estima que la producción de azúcar de este ingenio y muchos otros del país utilizan más de un 60 % el bagazo como combustible y el 40 % de combustóleo, además de quemar los campos de caña sin invertir en tecnologías que disminuya el daño ecológico (Mazari, 2009).

Las partículas generalmente ácidas, que contienen hollín y otros derivados de las emisiones vehiculares e industriales, corresponden a la fracción más pequeña (PM<sub>2.5</sub>) y agresiva debido a que éstas son respirables en un 100% y tienen mayor efecto en la salud, ya que pueden ingresar al sistema respiratorio depositándose en los alveolos pulmonares y llegar al torrente sanguíneo produciendo efectos negativos en la misma, tales como aumento en las enfermedades respiratorias y cardíacas, asma, bronquitis, enfisema, cáncer pulmonar, y disminución del funcionamiento pulmonar (Samet, 2000). Entre más pequeñas sean las partículas pueden penetrar directamente hasta el interior de los pulmones con posibles efectos tóxicos debido a sus inherentes características fisicoquímicas.

La exposición a los contaminantes liberados por la quema de la caña de azúcar genera inicialmente irritación en las mucosas respiratorias y nasales, seguida de una hiperreactividad alérgica ocasionada por la inflamación del sistema respiratorio (Passali, Lauriello, & Mezzedimi, 1999).

Un estudio, realizado en Araraquara ubicado al suroeste de Brasil, determinó las concentraciones de PM<sub>10</sub> y HPA en el aire durante las temporadas de zafra y no zafra por medio de campañas de muestreo con equipos de bajo y alto volumen. Como resultado de este estudio se concluyó que los niveles de HPA aumentaron en la temporada de zafra (Moreira Dos Santos, 2002).

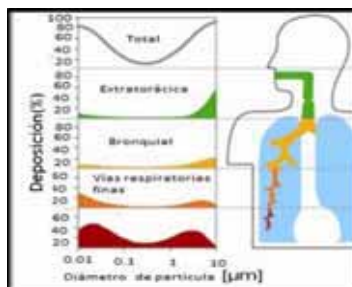
Dentro de este escenario, la región de Piracicaba, ubicado en São Paulo, es especialmente interesante porque el ambiente de esta región recibe emisiones no sólo de fuentes industriales y urbanas sino también, y principalmente de la quema de la caña de azúcar (Lara et al. 2001). En este estudio, se investigó la influencia de la PM generada a partir de la quema de la caña de azúcar en las hospitalizaciones respiratorias de los niños y los ancianos.

Durante la combustión incompleta, la formación de compuestos que no se oxida completamente, tienen un efecto irritante para el sistema respiratorio y, en algunos casos, carcinogénico. Malilay (1999) afirmó que las partículas finas al llegar a los alvéolos en grandes concentraciones, pueden entrar en el torrente sanguíneo o permanecer en los pulmones, dando lugar a enfermedades crónicas como el enfisema. Vapores orgánicos tóxicos tales como los HAP son posiblemente cancerígenos. El monóxido de carbono puede causar hipoxia mediante la prevención de la sangre de llevar suficiente oxígeno.

En un estudio sobre la incidencia que tiene la quema de la caña de azúcar, sobre enfermedades respiratorias en la población vecina en dos centros de producción de los Valles del Estado de Aragua, Venezuela. En el cual se menciona que en el año 1991 y 1992, los registros Sanitarios indican que en la época de zafra (Noviembre-Abril) hubo una alta incidencia en Bronquitis (72% de los casos, siendo 2,6 veces la cantidad registrada en el periodo de no zafra. (Hernández, 1995).

Los impactos ocasionados por la quemadas agrícolas son las emisiones de HPA y  $PM_{2.5}$ , estas pueden causar cáncer y enfermedades en las vías respiratorias, tos, flema y asma, como ejemplo de esto durante la temporada de zafra o quema de la caña de azúcar se ha observado un aumento de los casos de ataque de asma en la población que vive cerca de los cañaverales en el sur de Luisiana, Estados Unidos, donde las admisiones hospitalarias por enfermedades respiratorias aumentaron un 50% durante esta época (Boopathy, 2002).

En Estados Unidos, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) cita que las partículas  $PM_{10}$  (partículas de tamaño igual o inferior a 10 micras) son responsables de disminución de la función pulmonar, arritmias, bronquitis crónica, enfermedades como el asma y muerte prematura. Los aerosoles también pueden causar daños a la salud humana, en particular las ( $PM_{2.5}$ ) partículas menores a 2,5 micras de diámetro aerodinámico, parecen tener el mayor potencial para dañar la salud porque pueden penetrar profundamente en los pulmones y llegar al aparato respiratorio inferior como se presenta en la Figura 15 (American Thoracic Society, 1996). A pesar de su importancia, hay poca información acerca de las partículas de aerosoles emitidos por la quema de la caña de azúcar (Lara et al 2005).



**Figura 15: Esquema de la deposición de partículas atmosféricas en el sistema respiratorio en función del diámetro. Fuente: Modificado del Dr. Laskus.**

En el corto plazo, la contaminación por este tipo de partículas, puede causar el deterioro de la función respiratoria. En el largo plazo se asocia con el desarrollo de enfermedades crónicas, el cáncer o la muerte prematura. De acuerdo con estudios realizados en México, se estima que el riesgo de morir prematuramente se incrementa en 2% por cada incremento de  $10 \mu\text{g m}^{-3}$  de  $\text{PM}_{10}$ . La combinación de partículas suspendidas y óxidos de azufre tienen un efecto en la salud sinérgico (SEDESU, 2015).

El conocimiento de la composición química de las partículas que se encuentran en el aire es importante desde el punto de vista epidemiológico y técnico, ya que permite por un lado determinar el potencial efecto en la salud humana por la presencia de sustancias tóxicas y cancerígenas adheridas a este diminuto material (Piñeiro et al., 2003) y por otro, valorar el aporte de las fuentes de emisión a la contaminación del aire ambiente.

Los efectos adversos de las partículas en la salud humana han sido estudiados por décadas (Brunekreef and Holgate 2002). Los intentos para encontrar relación entre los efectos adversos a la salud y las propiedades del PM han aumentado significativamente (Englert, 2004). Para evaluar la toxicidad de las partículas se requiere un mejor conocimiento de las características físicas y químicas del aire, que dependen de las fuentes de origen, así como la intensidad de la emisión y la interacción molecular entre los componentes inorgánicos y orgánicos (Buschini et al., 2001; Schlesinger et al., 2006; Mugica et al., 2015).

Entre los contaminantes de vida corta (CVC) de mayor relevancia para la salud está el carbono negro, un componente común de las partículas finas ( $\text{PM}_{2.5}$ ), que es el contaminante del aire que más se asocia con la muerte prematura y la morbilidad, así como el ozono, el cual tiene impactos adversos sobre la salud respiratoria (WHO,2015).

## Capítulo 4. Marco teórico

### 4.1 Modelado del proceso y de la quema de caña de azúcar

#### 4.1.1 Modelos de dispersión

Los modelos de dispersión tienen muchas aplicaciones una de ellas es el control de la contaminación del aire, pues son herramientas que ayudan a los científicos a evaluar la dispersión de la contaminación del aire. La exactitud de los modelos está limitada por los problemas inherentes al tratar de simplificar los factores complejos e interrelacionados que afectan el transporte de los contaminantes del aire (CEPIS, 2005).

Para conocer el impacto de las emisiones de partículas en la población cercana, pueden aplicarse modelos de dispersión capaces de identificar las zonas que presentan concentraciones más altas, dependiendo de las condiciones de emisión y de los parámetros meteorológicos de velocidad y dirección del viento., a través de ecuaciones que describen las relaciones hipotéticas entre los contaminantes y los factores abióticos (Bustos,2014).

Estos modelos matemáticos son herramientas destinadas a simular, interpretar y predecir los procesos físicos y químicos que afectan a los contaminantes cuando se dispersan o reaccionan en la atmósfera. Se basan en datos meteorológicos, topográficos, tasas de emisión de los contaminantes desde su origen y las características físicas de la fuente (CEPIS, 2005).

Por otra parte para determinar la calidad atmosférica de una zona sin el uso de equipos de muestreo in situ, se han utilizado como herramienta modelos de dispersión atmosférica, con el fin de proporcionar información útil para el desarrollo de políticas públicas que protejan a la población o al ambiente (López-Martínez y Gutiérrez-Luju, 1999).

Los modelos de dispersión tienen como objetivo fundamental caracterizar el movimiento de los contaminantes atmosféricos primarios, que una vez emitidos ingresan directamente a la atmósfera y en algunos casos, contaminantes secundarios que se forman como resultado de reacciones complejas. Otro punto de importancia de los modelos matemáticos para la gestión de la calidad del aire, es que en base a estos se puede definir cómo contribuye una determinada fuente a los problemas de calidad del aire, para establecer un diseño efectivo de estrategias que permitan reducir sus emisiones contaminantes.

Actualmente existen programas para la modelación de contaminantes atmosféricos los cuales integran en su programación un esquema de modelación simple de tres etapas donde se tiene en primer lugar la entrada de datos conocidos, en segundo lugar el comportamiento supuesto del sistema mediante ecuaciones y en tercero la salida de datos que se desean conocer (Kieley,1999).

En resumen, los modelos de dispersión son una poderosa herramienta para la gestión de la calidad del aire, dado que permiten evaluar el impacto de la operación de fuentes fijas individuales o múltiples, así como predecir la efectividad de programas regulatorios. Antecedentes de la Unión Europea (EEA, 1999), Estados Unidos (US EPA, 1986, 1987 y

2003), Argentina (CNEAA, 1997) y el Banco Mundial (WBG, 1998), la modelación es una herramienta necesaria para estimar los cambios en la calidad del aire provocados por una o un conjunto de fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos” (Bustos, 2004).

Algunos informes del Banco Mundial manifiestan la necesidad de aplicar modelos de calidad del aire con propósitos regulatorios, de difusión pública o de investigación y para ello proponen criterios para su uso. Estos criterios guían a los usuarios durante la aplicación de modelos con el objetivo de proveer bases comunes para estimar la concentración de contaminantes en el aire.

Otros modelos son los numéricos los cuales son obtenidos a partir de las características químicas y físicas, relacionadas con los fenómenos de transporte, difusión, transformación y remoción de contaminantes y, requieren de información científica experimental muy extensa. Mientras que los modelos empíricos se basan en análisis estadísticos de datos obtenidos de calidad del aire, datos de fuentes de emisión y datos meteorológicos registrados para una localidad específica (CEPIS, 2005).

Estos modelos requieren de una cantidad importante de datos meteorológicos y de una buena base de datos de emisión y son calificados sobre la base de un análisis de pruebas estadísticas estándar desafortunadamente, solo pueden ser aplicados en las localidades que dieron origen a esas bases de datos y solo un estudio profundo de los criterios de elaboración de estos modelos puede lograr su extrapolación a otros sitios. Sin embargo, los modelos semi-empíricos, que son una conjugación de las dos primeras clases, son los más utilizados actualmente, tanto por su facilidad de aplicación como por el tiempo requerido para su solución: estos modelos son del tipo gaussiano. Se les llama semi-empíricos porque tienen principios científicos, como el de la conservación de la masa, pero se apoyan en parámetros definidos y obtenidos de manera empírica, tales como los coeficientes de dispersión de los contaminantes (Ruíz, 2002).

A continuación se presenta posibles aspectos a tener en cuenta en la selección del modelo:

- Escala de tiempo y espacio bien definidas
- Dependencia del régimen en estado estacionario o tiempo
- Marco referencial ambiental
- Tipo de contaminante y mecanismos de reacción
- Tratamiento matemático de la turbulencia atmosférica
- Consideraciones para múltiples fuentes
- Tratamiento matemático de la topografía
- Tratamiento matemático del error inducido

La selección de escala tiempo, desde el punto de vista de la aplicación del modelo, depende de los efectos específicos para cada contaminante de las normas de calidad del aire y la variabilidad de las emisiones y de la meteorología. Las normas de calidad del aire están relacionadas con escalas de tiempo o rangos de exposición, en las cuales es posible que puedan existir efectos en la salud. La variabilidad de las emisiones está en función de la operación de la planta industrial, por citar un ejemplo; mientras que la variabilidad en la meteorología tiene que ver con la estabilidad atmosférica.

Los modelos son de flujo estacionario o de tiempo variable, dependiendo si el tiempo está explícito en su formulación. Si el sistema representa el promedio de un estado del fenómeno en cierto periodo, el modelo es de estado estacionario. Los modelos de estado



estacionario son aplicables cuando el tiempo y la escala espacial es pequeña o cuando el resultado deseado sea lo suficientemente extenso como para que puedan ser ignoradas o promediadas las variabilidades en los efectos de los contaminantes, las emisiones y la meteorología (US EPA, 1987).

El marco de referencia de los modelos de calidad del aire, está determinado en la mayoría de los casos por un sistema de coordenadas x, y, z. Si el sistema de referencia esta fijo, sobre la superficie de la tierra, a la fuente de emisión, se dice que es marco euleriano; y si el sistema de referencia se fija en una nube de contaminantes que se mueven en una corriente, viento debajo de la fuente, se llama lagrangiano (Ruiz, 2002).

La dispersión es la evolución del estado de los contaminantes respecto a un sistema de referencia, ella depende de muchos factores relacionados como: la naturaleza física y química de los contaminantes, las características meteorológicas del ambiente, el terreno sobre el cual se transportan y se difunden y la altura de las fuentes respecto a la superficie.

La topografía de una localidad específica puede: generar campos de turbulencia, modificar vientos horizontales y verticales y, cambiar las distribuciones de temperatura y humedad dentro de la capa límite planetario. Estos factores influyen en el tipo del tratamiento del modelo; así, se pueden tener modelos para terreno plano homogéneo, terreno plano no homogéneo o complejo, o bien para valles o terrenos accidentados (US EPA, 1987).

El desarrollo de modelos de dispersión tiene límites, mientras los modelos de pronóstico de calidad del aire describen matemáticamente el comportamiento de gases y partículas en la atmósfera; sin embargo, el contaminante puede presentar transformaciones físicas, químicas o ambas. De esta manera, los modelos de dispersión pueden estar desarrollados para considerar diversos tipos de mecanismos de transformación. Los modelos pueden ser para contaminantes no reactivos y reactivos y, pueden, además, considerar transformaciones de gas a partículas, procesos de gas depositado en partículas y procesos de partícula a partícula (Ministry for the Environment, 2000).

Para la determinación de un modelo de dispersión la literatura recomienda que no se dispone de información suficiente, es decir, cuantificación total de las emisiones a la atmosfera por sector, determinación de las velocidades de viento a la altura deseada y porcentaje de representación en cada una de las direcciones predominantes y determinación de los niveles estratigráficos de la temperatura entre otros, se deben efectuar diferentes consideraciones preliminares y usar modelos flexibles de dispersión de contaminantes como lo es el Modelo Gaussiano.

El Modelo de dispersión Gaussiano es una ecuación de balance de materiales (contaminantes) del aire en la zona de estudio y permite establecer condiciones de frontera aplicando la ecuación de balance. En donde nos interesa la acumulación de los contaminantes en un área determinada, se establece que las acumulaciones, son iguales a la suma de las salidas más destrucciones menos las entradas y creaciones.

Al considerarse un balance de materia se tiene un cubo del espacio cercano a la columna de humo y un material que no se ha creado ni destruido en la atmosfera. Como se muestra en la Figura 16:

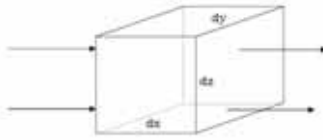


Figura 16: Dimensiones del cubo usado para el balance de materia

Para el balance de materia tenemos:

$$(\text{Velocidad de acumulación}) = \sum(\text{Gastos de entrada}) - \sum(\text{Gastos de salida}) \quad (4.1)$$

Como el volumen no cambia con el tiempo y la velocidad de acumulación es la derivada con respecto al tiempo de la cantidad contenida, queda:

$$\text{Velocidad de acumulación} = \frac{\partial}{\partial t}(CV) = V \frac{\partial}{\partial t} = dx dy dz \frac{\partial C}{\partial t} \quad (4.2)$$

Donde:

V: Volumen del cubo

C: Concentración

Lo anterior se refiere al cálculo de la tasa de difusión de una especie gaseosa en la dirección x. En cualquier área de sección transversal, en donde no se tiene flujo másico al interior del cubo, ya que se mueve en la dirección del viento, pero si a través de las seis caras del cubo, se establece que la tasa de cambio dentro de un volumen diferencial  $d_x d_y d_z$  debido al transporte de volumen y los proceso de difusión, se puede expresar por la ecuación:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(Cu) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial(D_x C)}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial(D_y C)}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial(D_z C)}{\partial z}\right) \quad (4.3)$$

Donde:

u : Velocidad del viento

$D_x$ ,  $D_y$  y  $D_z$ : Difusividades de masa en las direcciones x, y, z respectivamente.

Para obtener un resultado correcto a través del cálculo de las emisiones atmosféricas los autores proponen una serie de simplificaciones a la ecuación anterior:

- 1-. La transferencia de masa debido al movimiento del volumen es mayor que la contribución debida a la difusión de masa.
- 2-. Se asume estado estacionario para la dispersión de contaminantes a la atmósfera.
- 3-. Se considera la velocidad del viento constante en las tres direcciones.
- 4-. Se supone que las difusividades de masa  $D_x$ ,  $D_y$  Y  $D_z$ , son constantes

Las cuatro idealizaciones transforman la ecuación 3 en.

$$u \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right) = D_y \left( \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) + D_z \left( \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right) \quad (4.4)$$

La ecuación anterior es un tipo de ecuación diferencial parcial de segundo orden, cuya solución es:

$$C = K_x^{-1} * \exp \left[ - \left[ \left( \frac{y^2}{D_y} \right) + \left( \frac{z^2}{D_z} \right) \right] \frac{u}{4x} \right] \quad (4.5)$$

De lo anterior se concluye que las diferentes teorías de función de distribución de contaminantes tienden hacia la función gaussiana, determinando que los contaminantes se distribuyen en la atmosfera en forma de campana de gauss, donde se aplica los principios de estadística, en la parte de la desviación normal, que determina que el 68% del área bajo una curva se encuentra comprendida entre  $\pm\sigma$  y más del 95% está entre  $\pm 2\sigma$ . Se establece que una variable se encuentra normalmente distribuida si la función de densidad  $f(x)$  satisface la ecuación:

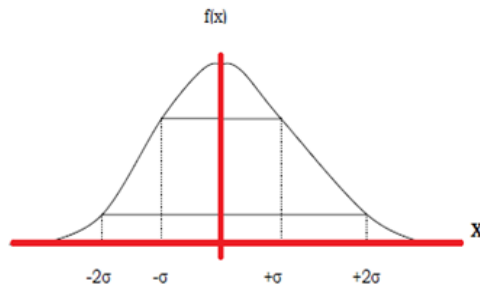
$$f(x) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \exp \left[ \frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \right] \quad (4.6)$$

Donde:

$\mu$ , es un número real

$\sigma$ , es un número real diferente de cero.

En la figura 17 se presenta la gráfica de una distribución Gaussiana o Normal:



**Figura 17: Función de Distribución Gaussiana o Normal.**

Se trabajó con un modelo matemático Gaussiano de dispersión de contaminantes, el cual se basa en una ecuación que se detalla más adelante, esta ecuación está orientada a la determinación de las concentraciones de contaminantes (en este caso partículas) a distintas distancias sobre una sola dirección y con este modelo se pretende tener un conocimiento aproximado de cómo impactan las emisiones del Fideicomiso Emiliano Zapata a sus alrededores.

El modelo Gaussiano sin reflexión en estado estacionario con modificación a la ecuación de Sutton la cual consiste en tomar en cuenta que las partículas a partir de cierto tamaño tienden a sedimentar. En este caso se consideró la velocidad terminal dada por la ecuación de Stokes, (ecuación 1):

$$C_i(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{\left(-H + \frac{xV_t}{u}\right)^2}{\sigma_z^2} \right) \right] \quad (4.7)$$

En donde  $C_i(x, y, z)$  es la concentración del contaminante  $i$  ( $g/m^3$ ),  $Q$  es la tasa de emisiones de mismo contaminante  $i$  por unidad de tiempo ( $g/s$ ),  $u$  es la velocidad del viento ( $m s^{-1}$ ),  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  son coeficientes de dispersión que dependen de la clase de estabilidad y de la distancia al foco en la dirección del viento (m),  $y$  y  $x$  son las distancias en metros sobre el eje  $y$  y el eje  $x$  respecto a la línea de viento.  $H$  es la altura efectiva de la chimenea la cual se determinó empleando la ecuación de Holland (Figura 18).

$$\Delta h = \frac{V_s D}{u} \left[ k_1 + k_2 PD \frac{(T_s - T_a)}{T_s} \right] \quad (4.8)$$

Donde:

$V_s$  = Velocidad de salida del gas en  $m s^{-1}$

$D$  = Diámetro de la chimenea en m

$u$  = Velocidad del viento  $m s^{-1}$

$P$  = Presión en milibares

$T_s$  = Temperatura de la chimenea en K

$T_a$  = Temperatura atmosférica en K

$K_1 = 1.5$

$K_2 = 2.68 \times 10^{-3}$

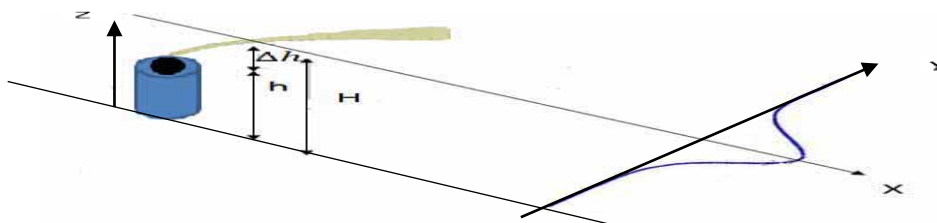


Figura 18: Esquema de la pluma Gaussiana en dirección del viento x

Fuente: Elaboración propia

En la aplicación de un modelo de dispersión se deben tener presente varias condiciones adicionales como son:

1. Las concentraciones que se estiman, representan aproximadamente sólo los cientos de metros mas bajos de la atmosfera.

2. El tiempo de muestreo corresponde aproximadamente a 10 minutos, ya que el modelo da los mejores resultados para periodos cortos de tiempo.
3. Las concentraciones se calculan a diferentes distancias (x) a lo largo de la línea central.

Los parámetros meteorológicos como: temperatura, dirección y velocidad del viento se obtuvieron de la Estación Sinóptica Meteorológica 76729 ubicada en Zacatepec, Morelos (99° 12' 26"; 18° 38' 39") que es parte del Servicio Meteorológico Nacional de Redes de Estaciones Sinópticas Meteorológicas (ESIME) como se muestra en la Figura 19 las partes que conforman la estación .

Los factores meteorológicos incluyen todos los parámetros que definen el transporte y dispersión de los contaminantes emitidos. Estos datos son obtenidos por medio de una Estación Sinóptica Meteorológica la cual está conformada por un conjunto de dispositivos eléctricos que realizan mediciones de las variables meteorológicas de manera automática. Generan una base de datos y generan un mensaje sinóptico cada tres horas.

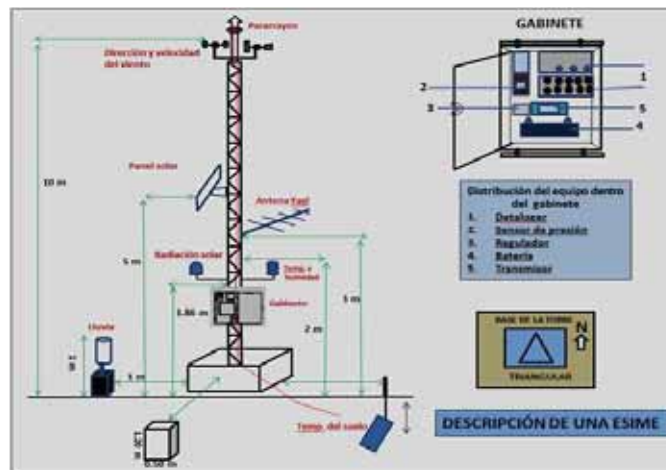


Figura 19 : Esquema de una Estación Sinóptica Meteorológica. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional, México

A partir de la velocidad de los vientos y la radiación solar se calcula la estabilidad atmosférica, posteriormente se calculan las desviaciones por método teórico, ver Tabla 2.

Tabla 2: Condiciones meteorológicas que definen las clases de estabilidad de Pasquill.

$U_{10}/m\ s^{-1}$	Día, radiación solar			Noche	
	Fuerte	Moderada	Débil	Nubes > 1/2	Nubes < 3/8
<2	A	A-B	B		
2 - 3	A-B	B	C	E	F
3 - 5	B	B-C	D	D	E
5 - 6	C		D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

Fuente: De Nevers, 2000. Air Pollution Control Engineering. New York. Mc Graw- Hill.

Martin en 1976 propuso otras correlaciones para estimar los valores  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  las cuales son:

$$\sigma_y = ax^b \quad (4.9)$$

$$\sigma_z = cx^d + f \quad (4.10)$$

Las constantes a, c, d y f están en función de la clave de categoría de estabilidad Pasquill y b siempre toma el valor de 0.894; así mismo, x es la distancia en el eje x y debe de estar en kilómetros.

La estabilidad atmosférica indica la capacidad de la atmosfera para dispersar los contaminantes; entre mayor sea la estabilidad (Turner, 1969): A es la más inestable, B moderadamente inestable, C ligeramente inestable, D neutra E ligeramente estable y F el más estable (Tabla 3).

**Tabla 3: Valores de constantes de acuerdo a la estabilidad y a la distancia.**

Estabilidad	x ≤ 1 km				x > 1 km		
	a	c	d	F	C	D	f
<b>A</b>	213	440.8	1.941	9.27	459.7	2.094	-9.6
<b>B</b>	156	106.6	1.149	3.3	108.2	1.098	2
<b>C</b>	104	61	0.911	0	61	0.911	0
<b>D</b>	68	33.2	0.725	-1.7	44.5	0.516	-13
<b>E</b>	50.5	22.8	0.678	-1.3	55.4	0.305	-34
<b>F</b>	34	14.35	0.748	-0.35	62.6	0.18	-48.6

Fuente: D.O.Martin. J.Air Pollu. Control Assoc.26, No. 2(1976); 145.

#### 4.1.2 Modelado Gaussiano de emisiones por quema

Las emisiones de la quema de biomasa representan una importante fuente global de partículas y gases a la atmósfera, especialmente en los trópicos, donde la quema de biomasa es generalizada. La quema de biomasa emite grandes cantidades de materia de carbono y partículas (PM). Las estimaciones muestran que el carbono anual y PM liberados a la atmósfera a causa de los incendios de biomasa en los trópicos es alrededor de 2 000-4 500 Tg y 36 000 -154 000Tg, respectivamente (Crutzen y Andreae, 1990).

Las quemas de biomasa han captado la atención de numerosas personas alrededor del mundo en los últimos años, por el aumento de partículas en la atmósfera (Dennis et al., 2002), que a su vez generan una problemática ambiental de grandes dimensiones ya que los efectos pueden cubrir una amplia gama de escalas temporales y espaciales. Los efectos derivados de la quemas de corta duración pueden ocasionar altas concentraciones de partículas que pueden afectar significativamente la salud humana (Yu et al.,2000).

Mientras que la emisión de partículas a escalas más amplias, puede afectar la calidad del aire (Meagher et al., 1998), así como clima regional (Liu 2005). La mayoría de las

partículas provenientes de las quemas tiene un diámetro menor de  $2.5 \mu\text{m}$  como lo han determinado estudios (Hays et al., 2002, Ferge et al., 2005).

El uso de modelos matemáticos para evaluar la calidad del aire en las ciudades se ha incrementado durante la última década, debido a las dificultades inherentes y costes implicados en el monitoreo. Estos modelos han sido adoptados de forma difusa por las autoridades locales con el propósito de evaluar y cuantificar la exposición de la población a contaminantes del aire y el cumplimiento con las normativas (Vardoulakis et al., 2005).

Para el modelado de la dispersión de partículas provenientes de la quema de la caña se puede utilizar el Modelo de V Smoke que parte de modelos Gaussianos, que se usan para determinar las concentraciones de las partículas a distintas distancias, como aplicación de este modelo se tiene el estudio de las concentración de partículas  $\text{PM}_{2.5}$  por la quemas prescritas de Brush Creek en Tennessee oriental el 18 de marzo de 2006 (Jackson et al. 2007).

Al mismo tiempo que se aplica algunas ecuaciones del modelo V Smoke (Lavdas, 1996), en el sistema de información geográfico Arcgis® desarrollado por Environmental Systems Research Institute (ESRI) nos ayuda a visualizar las zonas con mayor impacto. Esto ayuda a predecir los impactos en la calidad del aire por la quema de biomasa así como aproximar qué porcentaje de partículas se dispersa a nivel del suelo, y cómo el humo restante alcanza altura máxima en la atmósfera. En la Figura 20 se muestran las desviaciones estándar ( $\sigma_y$  y  $\sigma_z$ ) componentes básicos del modelo.

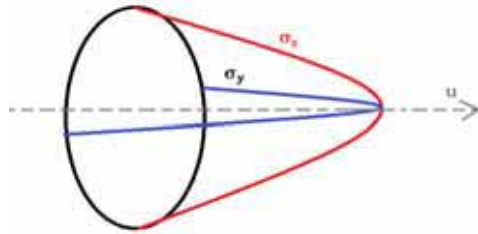


Figura 20: Gráfica de modelo Gaussiano en dirección del viento u.

Se aplica nuevamente la ecuación de Sutton (4. la cual consiste en tomar en cuenta que las partículas a partir de cierto tamaño tienden a sedimentar. En este caso se consideró la velocidad terminal dada por la ecuación de Stokes, (ecuación 1):

-Cálculo del tiempo de quema:

En esta sección se consideró una velocidad de propagación de  $30 \text{ min ha}^{-1}$ , lo que equivalió a  $V_p = 0.18 \text{ s m}^{-2}$ .

$$\text{Tiempo} = \text{Área} * V_p \tag{4.11}$$

En donde:

Área = Área de parcelas en  $\text{m}^2$   
 $V_p$  = Velocidad de propagación  $\text{s m}^{-2}$ .

-Cálculo de biomasa quemada por unidad de área:  
 En donde  $bs$  es la biomasa quemada por unidad de área estimada en  $3.98 \text{ kg m}^{-2}$ .

$$Kilos = \text{Área} * bs \quad (4.12)$$

$bs =$  biomasa quemada  $\text{kg m}^{-2}$ .

Cálculo de la tasa de emisión de calor sensible:

Se supuso material seco con un contenido calórico  $3500 \text{ cal g}^{-1}$  o  $14.65 \text{ KJ Kg}^{-1}$  (SFPLP, 1976).

$$Q_H = 14.651\hat{M} \quad (4.13)$$

En donde:

$\hat{M} =$  Tasa de quema de caña =  $22.11 \text{ kg s}^{-1}$   
 $Q_H =$  Emisión total de calor sensible Mw

Se Aplicaron las ecuaciones de V-Smoke Lavdas (1996) para estimar el flux de calor y la altura de las plumas

-Cálculo del flux del calor de las emisiones:

En dónde:

$F =$  Flux de calor de las emisiones  $\text{m}^4 \text{ s}^{-3}$

$$F = 8.8021Q_H \quad (4.14)$$

Usando la ecuación se calcula la altura de la pluma:

$$H_{FNUS} = 21.425 F^{0.75} / V \quad (4.15)$$

En donde:

$H_{FNUS} =$  Altura final de la pluma (m)

$V =$  Velocidad del viento ( $\text{m s}^{-1}$ )

Factores de emisión para la quema de caña (base seca) (Hall et al., 2012):

$$Fe_{PM10} = 3.0 \text{ g kg}^{-1} \quad (4.16)$$

$$Fe_{PM2.5} = 2.5 \text{ g kg}^{-1} \quad (4.17)$$

Tasa de emisión para la quema de caña (base seca):

$$Q_{P_{PM10}} = 3000000\hat{M} \quad (4.18)$$



$$Q_{P_{PM2.5}} = 2500000\hat{M} \quad (4.19)$$

En donde:

$Q_P$  = Tasa de emisión de partículas ( $\mu\text{g s}^{-1}$ )

$\hat{M}$  = Tasa de quema de caña ( $\text{kg s}^{-1}$ )

Velocidad terminal de sedimentación de las partículas (Hocking, M. 1998):

$$PM_{10} = 0.0003 \text{ m s}^{-1} \quad (4.20)$$

$$PM_{2.5} = 0.00002 \text{ m s}^{-1} \quad (4.21)$$

## Capítulo 5. Metodología

### 5.1 Diseño de Campañas:

Para obtener una muestra representativa de los niveles a los que están expuestos los habitantes en zonas cercanas al Ingenio. La selección del sitio de monitoreo y ubicación de los equipos requeridos se hizo tomando en cuenta criterios como: Dirección del viento y objetivos del estudio. Primero se realizó un análisis estadístico, para conocer la predominancia del viento, resultando hacia el sur donde Jojutla es lugar idóneo del monitoreo, después se seleccionó un lugar muy cercano al Ingenio, como es el Palacio Municipal en Zacatepec de Hidalgo, posteriormente se eligió un lugar cercano a los cañaverales como lo es Galeana.

Para conocer el tiempo y las fechas en que se realizara el monitoreo se consideraron tres etapas: la primera y la más importante la época de zafra que inicia de noviembre a mayo y consiste en la quema de los cañaverales la cual se considerara como campaña con actividad agroindustrial así como la campaña con actividad Industrial referente al funcionamiento del Ingenio, la siguiente campaña y la última sin quemas ni funcionamiento del Ingenio (Tabla 4).

Tabla 4: Diseño de campañas

Lugar	Tipo de Muestreador	Muestreador	Días de Muestreo
Zacatepec	Alto-Volumen Bajo -Volumen	PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub>	<b>Actividad Agroindustrial</b>
			24 feb-03 mar 14
			8 mar-14 mar 14
Jojutla	Bajo - volumen	PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub>	28 mar-03 abr 14
			<b>Actividad Industrial</b>
			7 may-13 may 14
Galeana	Bajo - volumen	PM <sub>10</sub> y PM <sub>2.5</sub>	<b>Sin funcionamiento de Ingenio y sin quemas</b>
			30 jun-6 jul14

#### Sitios de muestreo:

Se seleccionaron tres zonas cercanas al ingenio azucarero Fideicomiso Emiliano Zapata: Zacatepec de Hidalgo, Jojutla y Galeana en el Estado de Morelos, ubicadas a 0.750 Km, 3.449 Km, y 4.939 Km del ingenio .En el Palacio Municipal de Zacatepec se colocaron seis equipos, 2 de alto volumen (Hi Vol), con cabezal PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> Tisch a un flujo de 1.2 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup> y 4 equipos de bajo volumen (Mini Vol, Airmetrics).Para el muestreo en Jojutla 4 equipos de bajo volumen (Mini Vol, Airmetrics) y para Galeana, se utilizaron 2 equipos de bajo volumen (Mini Vol, Airmetrics) zonas ubicadas, 3.4 Km, y 4.9 Km del ingenio respectivamente. El clima predominante es cálido, de baja humedad y precipitaciones en verano, su temperatura media es de 24.2°C y su precipitación pluvial promedio es de 886 milímetros al año (Figura 21) (INEGI, 2009).

Los sitios reunieron condiciones de seguridad, disponibilidad de energía eléctrica, y se encontraban libre de obstáculos, con el propósito de obtener mediciones representativas,

como hace referencia el Método de Referencia de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Manual Reference Method: 40 CFR Part 50, Appendix B) establece los criterios representativos para la localización de los sitios de muestreo.



**Figura 21: Localización de los equipos de muestreo**

Posterior a la colocación de los equipos de muestreo se llevó a cabo la calibración usando el método de calibración por orificio (GMW-25). Este equipo de calibración se compone de un adaptador para la base del filtro, un cilindro con orificio, cinco placas con 18, 13, 10, 7 y 5 orificios respectivamente, empaques, un manómetro de agua y manguera para conectarlo al cilindro (Figura 22).



**Figura 22: Estándar de calibración de flujo de alto volumen**

### **Recolección de partículas $PM_{10}$ $PM_{2.5}$ :**

La medición de partículas atmosféricas se realizó con muestreadores de alto volumen marca Tisch Environmental y de bajo volumen (MiniVol Portable, Airmetrics). Durante el muestreo el aire es obligado a pasar por un filtro de baja resistencia, con un flujo determinado dependiendo del equipo (Figura 23).

Para la medición en equipos de alto volumen el material de los filtros que se utilizaron fue de cuarzo con las siguientes medidas: 30x25 cm, el tiempo de muestreo fue de 24 horas con un flujo promedio de  $66.26 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ .

En tanto a la colección de partículas con muestreadores de bajo volumen (MiniVol Portable, Airmetrics), con un tiempo y flujo de muestreo de 24 horas con un flujo promedio de 5.0 LPM, se utilizaron filtros de cuarzo y de teflón de 47 mm de diámetro.

Las muestras deben ser transportadas en bolsas con cierre hermético. A la hora de colocar el filtro dentro de la bolsa, se debe tener el cuidado de doblarlo de forma tal que la cara que contiene las partículas no quede expuesta, evitando así la pérdida de partículas.



Figura 23: Equipos de muestreo de alto y bajo volumen

### Determinación gravimétrica

#### Acondicionamiento y preparación de los filtros antes y después del muestreo:

Previo al muestreo se pre calcinaron a 700°C por 8 horas, los filtros de fibra de cuarzo (Whatman G653) para eliminar cualquier residuo de tipo orgánico. Además de los filtros de cuarzo se utilizó filtros de teflón para determinar la masa de las partículas colectadas por los minivol.

Todos los filtros se mantuvieron a peso constante y se determinará su peso antes y después de los muestreos utilizando una balanza analítica con 0.0001 g de precisión, ya que cada tipo de filtro será utilizado para diferentes caracterizaciones de las partículas.

Se mantuvieron a peso constante los filtros mínimo 24 horas verificando que las condiciones ambientales dentro del desecador sean tal que la humedad no supere el 50% y la temperatura no sea mayor a 30°C. La balanza se ubicó en un local donde las condiciones ambientales estén debidamente controladas temperaturas en torno a 20 ° C y humedades relativas próximas al 50 %. Se pesaron los filtros en una balanza analítica Ohaus Explorer y se anotó el resultado (Figura 24).

Inmediatamente después de realizar la operación de pesada por triplicado se colocó cada filtro dentro de una bolsa plástica con cierre hermético.

En cuanto a los filtros de teflón (Whatman 7592-104 PTFE) se colocaron en un contenedor cerrado con silica gel en un desecador por 24 horas y se pesó por triplicado. La micro balanza Meetler Toledo MT5 se ubicó en un sitio con condiciones ambientales controladas de temperatura a 20 ° C y humedad relativa próxima a 50 %.



Figura 24. Procedimiento de pesado de filtros en balanza analítica y en micro balanza.

### Procedimiento de pesada posterior al muestreo:

La masa final se determinó en el laboratorio, posteriormente, llevándose a cabo el manejo adecuado de los filtros y nuevamente acondicionando los filtros para eliminar humedad. Se pesan por triplicado. La masa de las partículas colectadas se determina por la diferencia de masas ( $m_2 - m_1$ ), dependiendo del tipo de filtro utilizado, el intervalo de colección de partículas puede incrementarse hasta cerca de 100  $\mu\text{m}$ .

Para determinar la concentración ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ), se debe conocer el volumen de aire que se filtró, en el intervalo de tiempo de muestreo, que por norma es de 24 h entre otros datos obtenidos, mediante métodos que cumplen con la Norma Oficial Mexicana (NOM-035, 1993), que lleva por título: "Método de Medición para Determinar la Concentración de Partículas Suspendidas Totales en el Aire Ambiente, y el Procedimiento para la Calibración de los Equipos de Medición".

### Determinación de Concentración

La concentración de partículas se obtuvo con base a la Norma Oficial Mexicana NOM-035- SEMARNAT-1993, la cual establece los métodos de medición para determinar concentración de partículas. Esta se realiza de la siguiente manera:

$$V = Q_{ptn} \times t \quad (5.1)$$

Donde:

V = Volumen ( $\text{m}^3$ ).  
Q<sub>ptn</sub> = Flujo patrón ( $\text{m}^3 \text{min}^{-1}$ )  
t = Tiempo (min)

Finalmente:

$$\text{Concentración} = \frac{(P_f - P_i) \times 10^6}{V} \quad (5.2)$$

Donde:

P<sub>i</sub> = Peso inicial ( $\mu\text{g}$ )  
P<sub>f</sub> = Peso final ( $\mu\text{g}$ )  
V = Volumen ( $\text{m}^3$ )

## 5.2 Método de Análisis de orgánicos y elementales de carbono Aerosoles

Existen diferentes métodos ópticos y termo-ópticos para la cuantificación de aerosoles carbonáceos, en nuestro estudio se utilizó un método termo-óptico. Para el análisis químico de los aerosoles de carbono elemental, se utilizó el equipo OC/EC Laboratory Marca Sunset Laboratory Inc, en la figura 25 se muestra el funcionamiento del equipo, en la figura 27 se puede ver el equipo utilizado para el análisis y los sitios en donde se llevó a cabo el monitoreo.

El instrumento de laboratorio OC/EC de Sunset laboratory se utilizó para analizar el aerosol de partículas recogidas en los filtros de cuarzo de fibra, tanto para el carbono orgánico y elemental.

Antes de realizar el análisis se elaboró una curva de calibración con tres puntos (56, 112 y 168  $\mu\text{gCmL}^{-1}$ ) a partir de una solución de sacarosa al (5.5  $\mu\text{gCmL}^{-1}$ ).

Las muestras deben ser recolectadas en filtros de fibra de cuarzo de 47mm o 37mm de diámetro. Los filtros pueden ser secciones de tamaño usadas, así como comparables de filtros Hi-Vol. El punzón usado para el análisis es de 1,0 cm por 1,5 cm de tamaño.

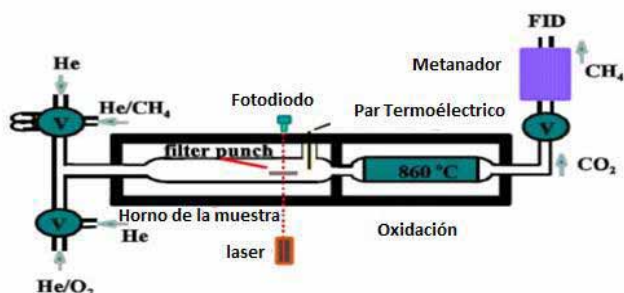


Figura 25: Diagrama de funcionamiento de Equipo Sunset Laboratory

El procedimiento se resume en lo siguiente:

### Parte A

En una atmósfera de helio completamente libre de oxígeno, la muestra se calienta hasta eliminar todo el carbono orgánico en el filtro. La transición de temperatura (500 °C a 700 °C) se descompone rápidamente carbonatos inorgánicos, produciendo un pico característico agudo.

Durante esta primera fase por lo general hay algunos compuestos orgánicos que se convierten en carbono elemental. Aproximadamente el 30% de los compuestos orgánicos pueden ser convertidos pirólicamente a carbono elemental. Esta conversión es monitoreada continuamente mediante la medición de la transmisión de un láser a través del filtro.

Se vaporizan los compuestos orgánicos, que se oxidan a dióxido de carbono. El flujo de helio, que contiene el dióxido de carbono, pasa a un horno conocido como metanador donde el CO<sub>2</sub> es reducido a (CH<sub>4</sub>), el cual es detectado por un detector de ionización de llama (FID).

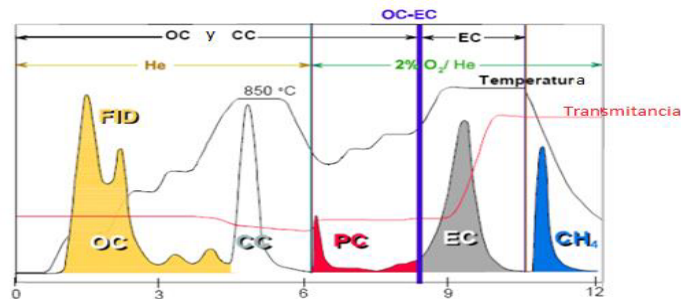
### Parte B

Después de que el horno de la muestra se enfría a 525 °C, el eluyente helio puro se conmuta a un 2% de mezcla de oxígeno / helio en el horno. A continuación, la temperatura del horno se eleva hasta 850 °C. Durante esta fase, tanto el carbono elemental original y la producida por la pirólisis de compuestos orgánicos durante la primera fase (Parte A) son oxidados a dióxido de carbono debido a la presencia de

oxígeno en el eluyente. El dióxido de carbono, como en la Parte A, se convierte entonces en metano y detectado por el FID. Como se ha indicado anteriormente, la oscuridad del filtro se controla continuamente a lo largo todas las etapas del análisis.

### Parte C

Después de oxidar todo el carbono de la muestra, un volumen conocido y concentración de metano se inyecta en el horno. Por lo tanto, cada muestra se calibra para una cantidad conocida de carbono. Esto también proporciona un medio para la correcta operación del instrumento. Sobre la base de la respuesta FID y la transmisión laser de datos, se calculan las cantidades de carbono orgánico y elemental para la muestra y se genera un termograma como se presenta en la Figura 26.



**Figura 26: Termograma para el contenido de carbón orgánico (OC), carbonato (CC), y carbón elemental (EC) en el filtro de muestra. PC es el carbón generado pirolíticamente “tostado”. El pico final corresponde a la calibración con Metano.**

Después de obtener la concentración de carbono elemental en  $\mu\text{gcm}^{-2}$ , con base en el área colmada del filtro, el tiempo de muestreo y el flujo volumétrico, se obtuvo la concentración de EC en  $\mu\text{gm}^{-3}$  con la ecuación 5.3.

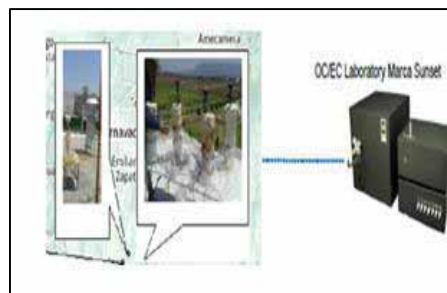
$$EC(\mu\text{gm}^{-3}) = \frac{EC(\mu\text{gcm}^{-2}) \cdot A(\text{cm}^2)}{V(\text{m}^3)} \quad (5.3)$$

Donde:

EC=Concentración de carbono elemental  $\mu\text{g m}^{-3}$

A=Área  $\text{cm}^2$

V= Volumen  $\text{m}^3$



**Figura 27: Equipo para cuantificar aerosoles de carbono**

### 5.3 Aplicación de un Modelo Gaussiano

Se utilizó el modelo Gaussiano sin reflexión en estado estacionario con modificación a la ecuación de Sutton la cual consiste en tomar en cuenta que las partículas a partir de cierto tamaño tienden a sedimentar. En este caso consideramos la velocidad terminal dada por la ecuación de Stokes (ecuación 4.7) y para el cálculo de elevación de la pluma la ecuación de Holland (ecuación 4.8).

Para conocer los valores de coeficientes de dispersión  $\sigma_y$  y  $\sigma_z$  primero calculamos la estabilidad atmosférica a partir de la obtención de patrones de velocidad y dirección del viento, durante el periodo de monitoreo que inicia de febrero a julio del 2014, a partir del análisis de la información meteorológica obtenido de la Estación Sinóptica Meteorológica 76729 ubicada en Zacatepec, Morelos con coordenadas siguientes: Longitud: 99°12'26", Latitud 18°38'39" y una Altitud de 910 metros, estación con la cual se realiza el monitoreo atmosférico de la zona y que es parte del Servicio Meteorológico Nacional de Redes de Estaciones Sinópticas Meteorológicas - ESIME. El área representativa de las estaciones es de 5 km de radio aproximadamente, en terreno plano, excepto en terreno montañoso (Referencia OMM número 100 y 168).

La estabilidad atmosférica se estimó tomando el valor  $u=0.92 \text{ m s}^{-1}$  considerando un día con insolación moderada por ser primavera/verano siguiendo el criterio de Turner (1969).

En la Tabla 2 se observa que la estabilidad para la presente modelación corresponde a la categoría A (Inestable).

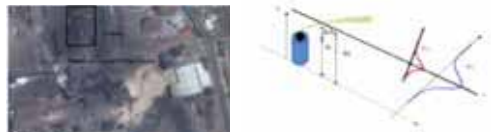
La estabilidad atmosférica indica la capacidad de la atmosfera para dispersar los contaminantes (Turner, 1969): Categoría A es la más inestable, B moderadamente inestable, C ligeramente inestable, D neutra E ligeramente estable y F el más estable.

Las correlaciones propuestas por Martin para estimar los valores de las desviaciones  $\sigma_z$  y  $\sigma_y$  se estiman con las ecuaciones 4.9 y 4.10.

Las constantes a, c d y f están en función de la clave de categoría de estabilidad Pasquill y b siempre toma el valor de 0.894; así mismo, x es la distancia en el eje x y debe de estar en kilómetros como se muestra en la Tabla 3.

Para la obtención del modelo se considera lo siguiente:

Debido a que en el Ingenio se tienen 4 fuentes puntuales de emisión de diferentes alturas y diámetros, y que el acceso a las mismas es restringido, la propuesta del presente trabajo es representar una sola fuente puntual y determinar la dispersión de las partículas (Figura 28).



**Figura 28:** Mapa de la ubicación de las calderas del Ingenio Emiliano Zapata (izquierda) y esquema de pluma Gaussiana en dirección de viento x (derecha).



En la tabla 5 se muestran los datos correspondientes a las calderas del Ingenio:

**Tabla 5: Características de las calderas del Ingenio**

Caldera	Altura	Diámetro (m)	Velocidad de flujo de gases(m/s)	Tasa de emisión de partículas(g/s)	Temperatura de salida de gases (K)	Presión (milibar)	Combustible
1	30	1.62	11.02	4.17	439.78	914.39	Bagazo
3	36	1.6	11.7	4.80	439.7	914.58	Bagazo-Combustoleo
4	30	1.6	11.44	4.49	432.47	914.91	Bagazo-combustoleo
5	36	1.6	12	4.49	410.6	913.44	Bagazo-combustoleo
<b>Total</b>	33	1.605	11.54	17.95	430.6375	914.33	Bagazo-combustoleo

Fuente: Datos obtenidos por el Ingenio Emiliano Zapata Zafra 2014

En la aplicación de un modelo de dispersión se deben tener presente varias condiciones adicionales como son:

1. Las concentraciones que se estiman, representan aproximadamente sólo los cientos de metros mas bajos de la atmosfera.
2. El tiempo de muestreo corresponde aproximadamente a 10 minutos, ya que el modelo da los mejores resultados para periodos cortos de tiempo.
3. Las concentraciones se calculan a diferentes distancias (x) a lo largo de la línea central.

El modelo Gaussiano aproxima la concentración de partículas a distintas distancias desde una fuente puntual a la altura de la chimenea como se muestra en la Figura18.

Para finalizar se realiza una sumatoria de cada fuente y se toma un punto central entre la ubicación del total de las fuentes.

#### **Calibración del modelo:**

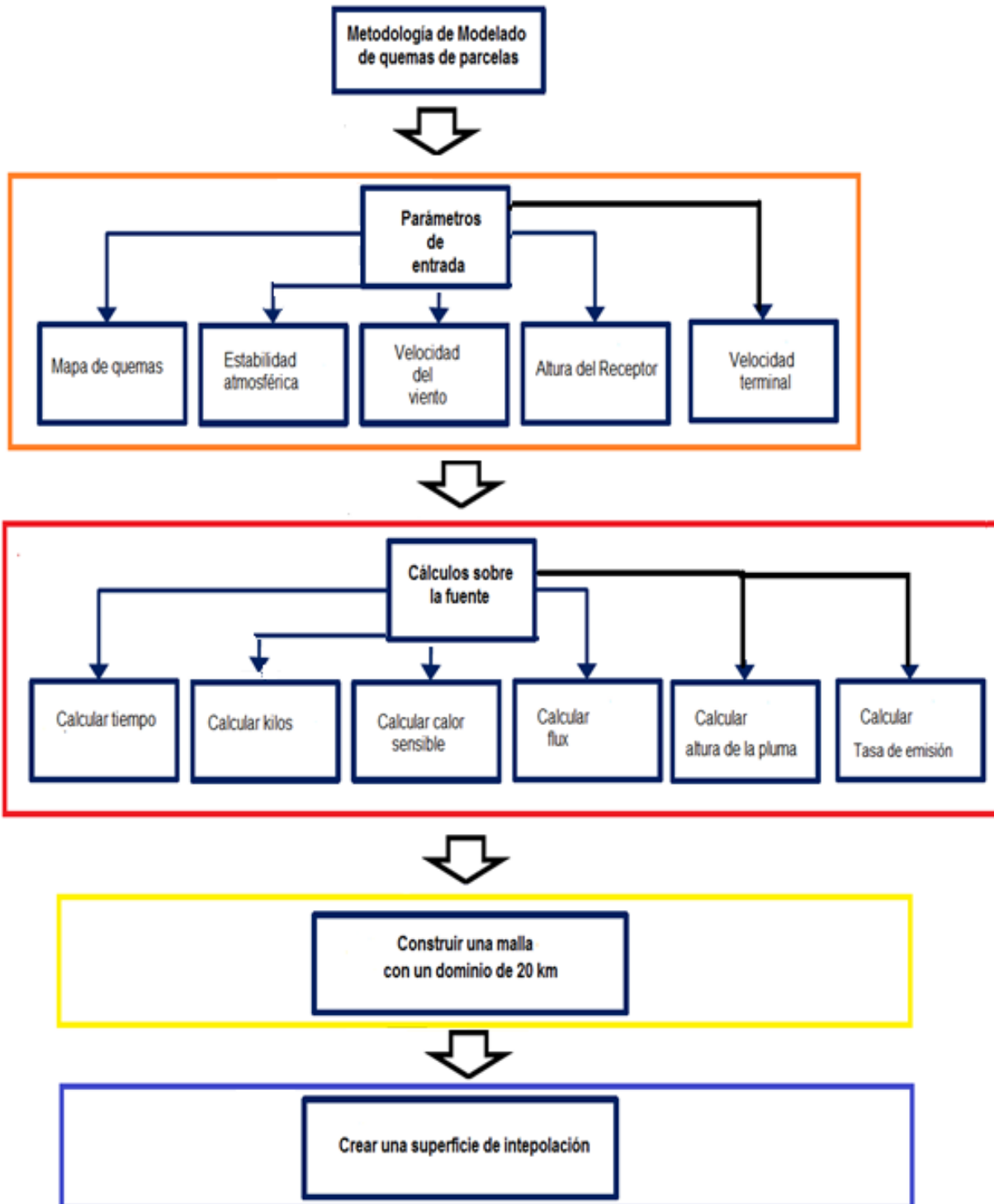
Se realiza con la finalidad de conocer el ajuste del modelo en comparación con las concentraciones medidas durante cada campaña. Además de determinar las aportaciones debidas a las quemas y por otra parte por el Ingenio.

Con el modelo Gaussiano se estiman la dispersión de partículas emitidas desde la fuente y con la información meteorológica de velocidad y dirección del viento se construye el modelo y se ajusta con de los datos de monitoreo del Palacio Municipal de Zacatepec el cual se encuentra a 0.750 km del Ingenio.

### **5.4 Modelado Gaussiano de emisiones por quemas**

En la Figura 29 se presenta un diagrama del proceso dividido en 4 secciones: parámetros de entrada, cálculos sobre la fuente, construcción de una malla y creación de superficie

de interpolación, para obtener las plumas de dispersión de partículas por quemas y conocer las zonas afectadas.



**Figura 29** : Diagrama del proceso para obtener la dispersión de partículas por quemas.

## Capítulo 6. Análisis de Resultados

### 6.1 Concentración de PM<sub>2.5</sub> Y PM<sub>10</sub> Zacatepec, Morelos

En las figuras 30, 31 y 32 se presentan las concentraciones de partículas PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en la zona de Zacatepec de Hidalgo en el estado de Morelos, durante un total de 3 campañas de las cuales, la primera es con el funcionamiento del Ingenio y quemas, durante la campaña 2 es solo el funcionamiento del Ingenio y la campaña 3 en ausencia de Ingenio y quemas.

En la figura 30 se observan las concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> de las cuales 71% y 14% respectivamente rebasan los límites permitidos (LP) establecidos por la norma NOM-025-SEMARNAT-2014, determinándose una mala calidad del aire.



Figura 30: Concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en Zacatepec, Morelos.

En la figura 31 se observan las concentraciones PM<sub>2.5</sub> están muy por debajo del límite permisible y de PM<sub>10</sub> solo 2 días de muestreo están al límite del valor permisible.

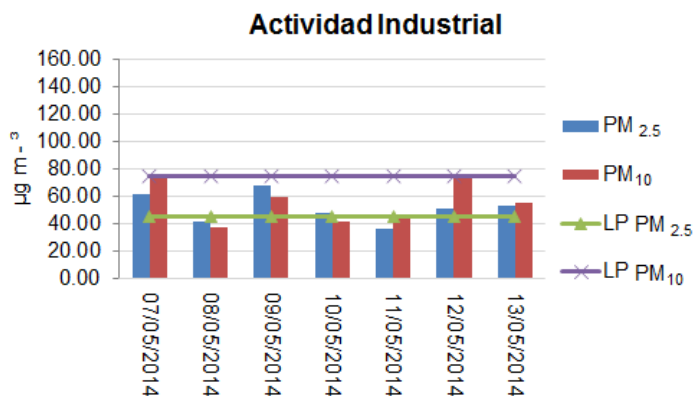


Figura 31: Concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en Zacatepec, Morelos.

En la figura 32 se observan las concentraciones PM<sub>2.5</sub> las cuales están muy por debajo del límite permisible y de PM<sub>10</sub> solo 2 días de muestreo están al límite del valor

permisible, los valores promedios de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> a este muestreo se utilizaran como valores de fondo o de referencia.

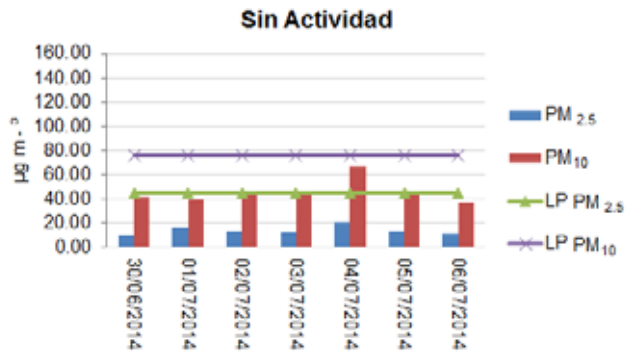


Figura 32 Concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en Zacatepec, Morelos.

La relación PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> en promedio durante la campaña 1 es de 0.84 durante la campaña 2 es de 0.58 y durante la campaña 3 fue de 0.29, lo que indica que durante la campaña 1, la presencia de partículas finas es mayor en relación con las gruesas que durante la campaña 2 y 3.

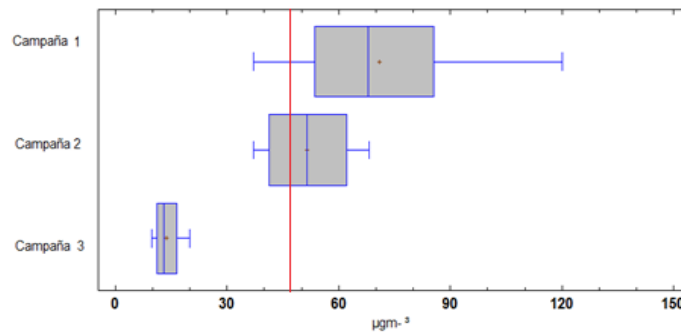
La proporción de partículas PM<sub>2.5</sub> con actividad agroindustrial respecto a solo actividad industrial es de 1.37 veces más alta, mientras que al comparar la actividad industrial con la época sin actividad es 3.7 veces más alta y hasta 5.1 veces mayor en actividad agroindustrial respecto a en ausencia de actividad.

La Tabla 6 muestra la concentración promedio, máxima, mínima y la desviación estándar de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> durante la campaña, así como los días en que se excedieron los límites de PM<sub>2.5</sub> (45 µg m<sup>-3</sup>) y PM<sub>10</sub> (75 µg m<sup>-3</sup>) con base en la NOM-025-SSA1-2014.

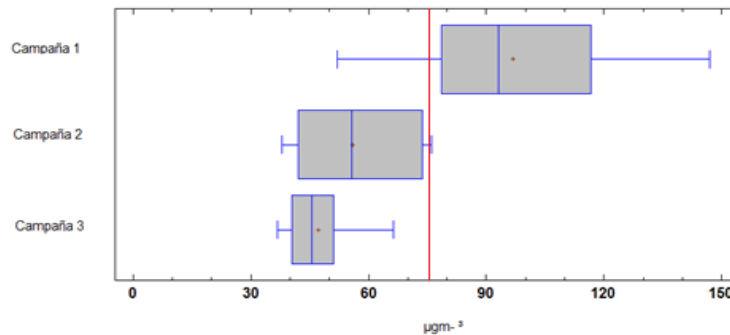
Tabla 6: Análisis estadístico de campañas en Zacatepec.

	A. Agroindustrial		A. Industrial		Sin actividad	
	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>
<b>N días</b>	23	23	7	7	7	7
<b>Promedio</b>	70.85	96.94	51.56	55.87	13.74	45.96
<b>Desviación Estándar</b>	23.58	25.78	10.91	15.06	3.48	9.70
<b>Coficiente de Variación</b>	33.29%	26.59%	21.16%	26.96%	25.34%	21.10%
<b>Mínimo</b>	37.02	52.12	37.02	38	9.8	36.75
<b>Máximo</b>	120.02	146.93	68.05	76.11	20.07	66.43
<b>Días por arriba de la norma</b>	19	19	5	1	0	0

En las Figuras 33 y 34 se muestra el grafico de caja y bigotes el promedio de partículas  $PM_{10}$  Y  $PM_{2.5}$  respectivamente durante las 5 campañas y el límite establecido por la NOM-025-SSA1-2014.



**Figura 33: Diagrama de caja y bigotes de Zacatepec  $PM_{2.5}$ .**



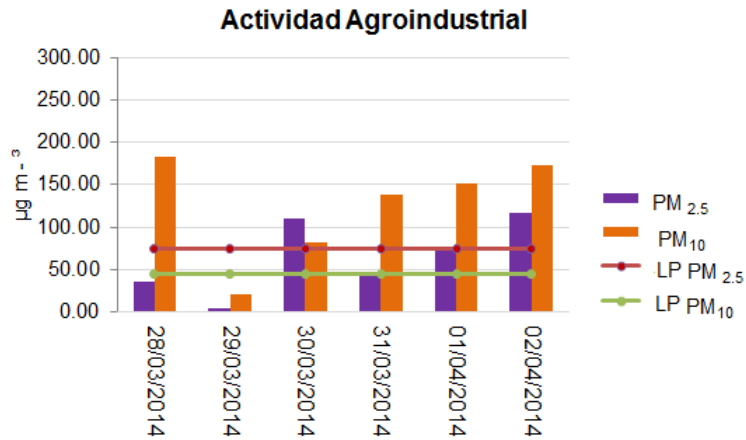
**Figura 34: Diagrama de caja y bigotes de Zacatepec  $PM_{10}$ .**

Se observan diferencias de las concentraciones de  $PM_{2.5}$ , lo cual se corrobora al realizar la prueba de Mann-Whitney con una cola y un nivel de confianza del 95%. (Anexo1), en la cual se observa el rechazo de la hipótesis nula ( $H_0$ ) lo que indica una diferencia significativa entre las mediciones durante la actividad agroindustrial en comparación con la de actividad industrial y en ausencia de actividad.

## 6.2 Concentración de $PM_{2.5}$ Y $PM_{10}$ Galeana, Morelos

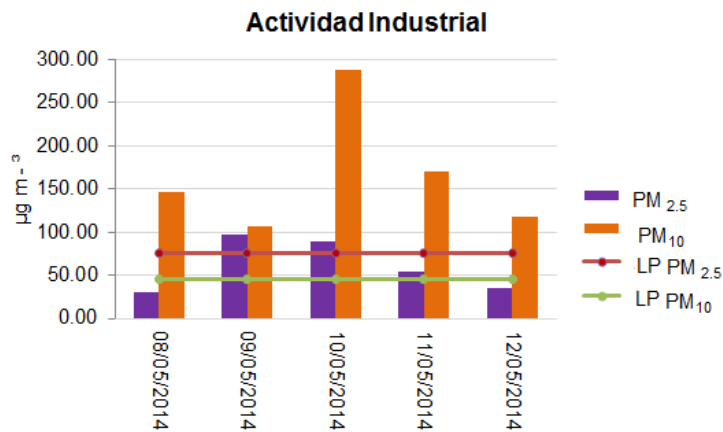
En las Figuras 35-38 se presentan las concentraciones de partículas  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$  en la zona de Galeana en el estado de Morelos, durante un total de 3 campañas, como se mencionó anteriormente.

En la figura 35 se observan las concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , de  $PM_{2.5}$  donde un 67% y 83% de los días de muestreo rebasan los límites de la norma, determinándose una mala calidad del aire en Galeana.

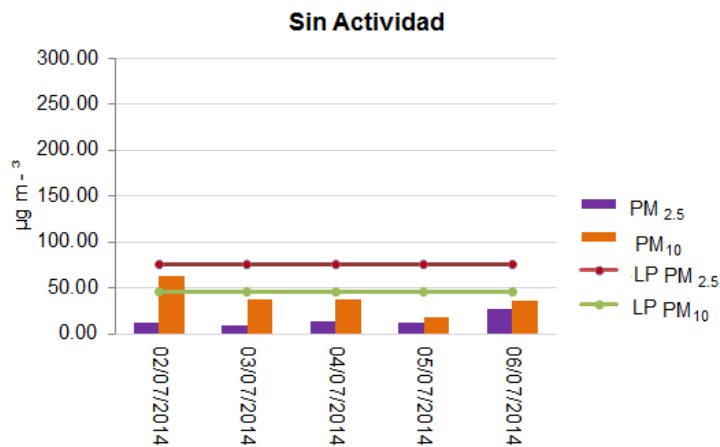


**Figura 35: Concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en Galeana, Morelos.**

En la figura 36 se observan las concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, así como PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> un 60% y 100% de los días de muestreo rebasan los límites de la norma, determinándose una mala calidad del aire en Galeana.



**Figura 36: Concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en Galeana, Morelos.**



**Figura 37: Concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en Galeana.**

La relación  $PM_{2.5}/PM_{10}$  en promedio durante la campaña 1 es de 0.52 durante la campaña 2 es de 0.37 y durante la campaña 3 0.39 respectivamente, lo que indica que durante la campaña 1 la presencia de partículas finas es mayor en relación con las gruesas que durante la campaña 2 y 3 que son valores similares.

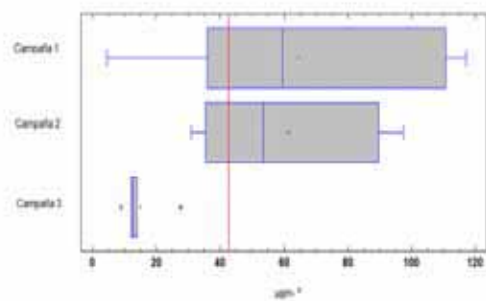
La proporción de partículas  $PM_{2.5}$  con actividad agroindustrial respecto a solo actividad industrial es de 1.05 veces mayor, mientras que al comparar actividad industrial y sin actividad es de 4.08 veces mayor.

En la tabla 7 se observa los días en que se excedieron los límites de  $PM_{2.5}$  ( $45 \mu g m^{-3}$ ) y  $PM_{10}$  ( $75 \mu g m^{-3}$ ) con base en la NOM-025-SSA1-2014.

**Tabla 7: Análisis estadístico de campañas en Galeana**

	A. Agroindustrial		A. Industrial		Sin actividad	
	$PM_{2.5}$	$PM_{10}$	$PM_{2.5}$	$PM_{10}$	$PM_{2.5}$	$PM_{10}$
<b>N días</b>	6	6	5	5	5	5
<b>Promedio</b>	64.48	124.62	61.32	165.62	15.02	38.54
<b>Desviación Estándar</b>	43.94	62.036	30.692	72.44	7.24	16.27
<b>Coefficiente de Variación</b>	68.15 %	49.78%	50.05%	43.74%	48.25%	42.23%
<b>Mínimo</b>	4.43	20.82	30.90	107.30	8.96	17.26
<b>Máximo</b>	116.9	182.51	97.38	287.45	27.59	63.08
<b>Días por arriba de la norma</b>	4	5	3	5	1	0

En la figura 38 y 39 se observa el diagrama de caja y bigotes en Zacatepec, Morelos donde se visualiza el promedio de las concentraciones de las partículas  $PM_{2.5}$  Y  $PM_{10}$  en los tres periodos con actividad agroindustrial, con actividad industrial y en ausencia de actividad así como el límite establecido por la NOM-025-SSA1-2014.



**Figura 38. Diagrama de caja y bigotes de Galeana  $PM_{2.5}$ .**

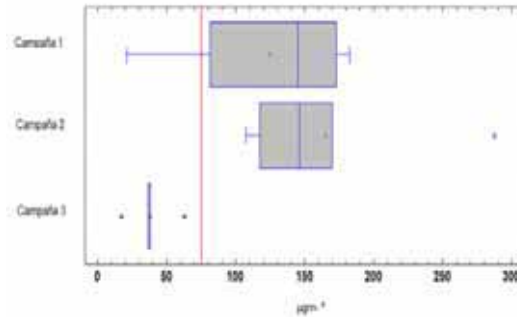


Figura 39: Diagrama de caja y bigotes de Galeana PM<sub>10</sub>.

Se observa las diferencias de las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> parecen ser muy distintas en ambos periodos, lo cual se corrobora al realizar la prueba de Mann-Whitney con una cola y un nivel de confianza del 95%. (Anexo1).

### 6.3 Concentración de PM<sub>2.5</sub> Y PM<sub>10</sub> Jojutla, Morelos

En las gráficas siguientes se presentan las concentraciones de partículas PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en la zona de Jojutla en el Estado de Morelos, durante un total de 3 campañas de las cuales, la primera es con el funcionamiento del Ingenio y quemas, durante la campaña 2 es solo el funcionamiento del Ingenio y la campaña 3 en ausencia de Ingenio y quemas.

En la figura 40 se observan las concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, las cuales rebasan los límites de norma en un 94% y 75% respectivamente de los días de muestreo, determinándose una mala calidad del aire en Jojutla.

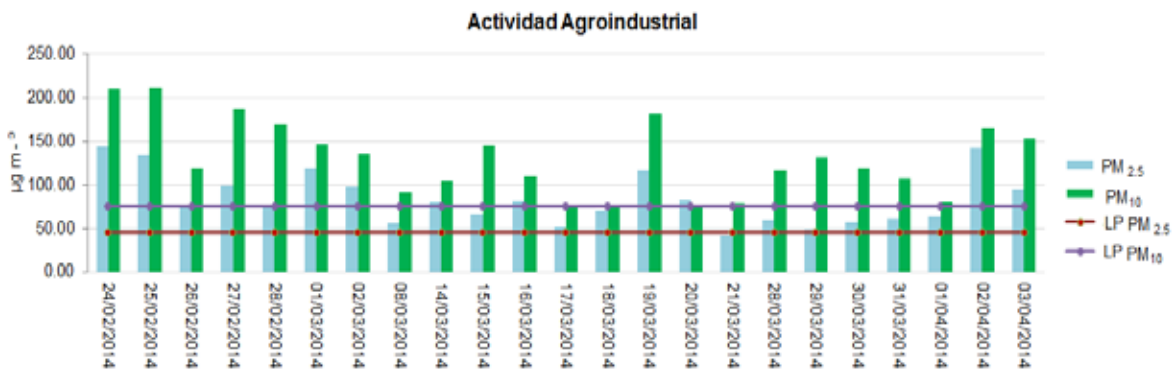


Figura 40: Concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en Jojutla.

En la figura 41 se observan las concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>, así como PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> un 86 % y 71% de los días de muestreo rebasan los límites de la norma, determinándose una mala calidad del aire en Jojutla.



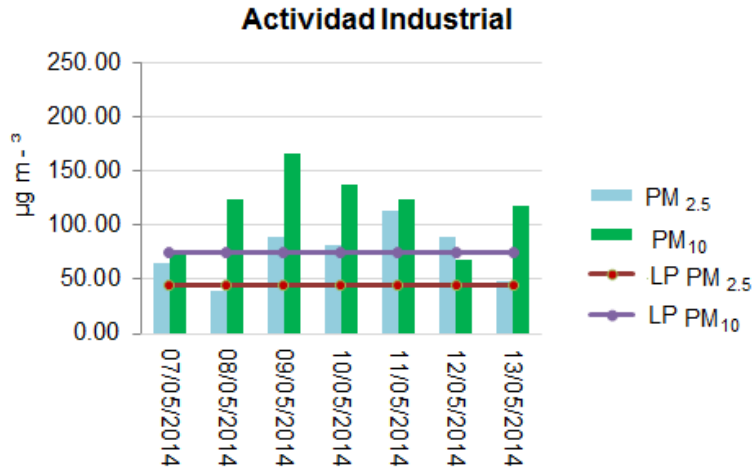


Figura 41: Concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en Jojutla.

En la figura 42 se observan las concentraciones PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> están muy por debajo del límite permisible de la norma por lo que la calidad del aire es muy buena.

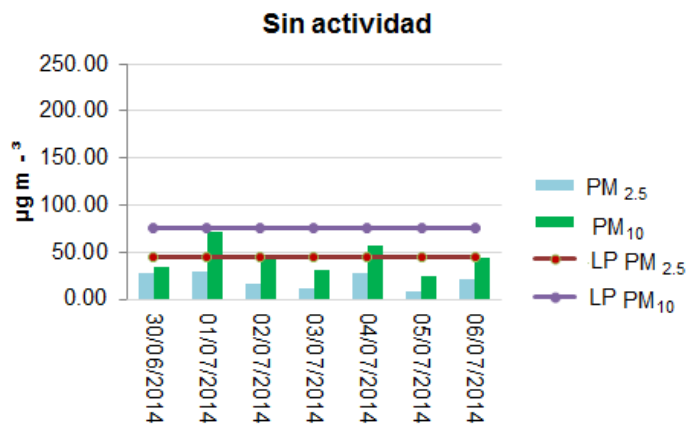


Figura 42: Concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en Jojutla.

La relación PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> en promedio durante la campaña 1 es de 0.64 durante la campaña 2 es de 0.65 y durante la campaña 3 0.47 respectivamente, lo que indica que durante la campaña 1 y 2 la presencia de partículas finas es mayor en relación con las gruesas que durante la campaña 3.

La proporción de partículas PM<sub>2.5</sub> con actividad agroindustrial es 1.1 veces mayor respecto a solo con actividad industrial, mientras que con actividad industrial es de 3.7 veces mayor que sin actividad y con actividad agroindustrial es 4 veces mayor que sin actividad.

Mientras que la proporción de partículas PM<sub>10</sub> con actividad agroindustrial respecto a con actividad industrial es de 1.1 veces, comparando cuando hay actividad industrial y sin actividad es de 2.6 veces mayor en el primer caso.

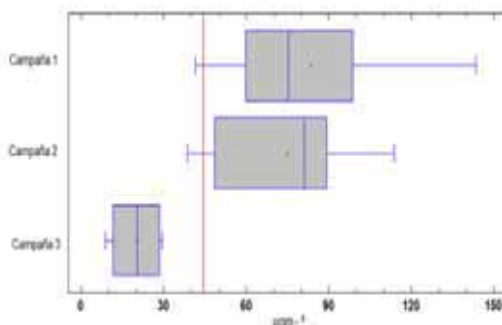
Lo cual indica que la aportación de partículas tanto  $PM_{2.5}$  como  $PM_{10}$  se duplica cuando solo hay actividad industrial, sin embargo se cuadruplica en el periodo de actividad agroindustrial.

En la Tabla 8 se observa los días en que se excedieron los límites de  $PM_{2.5}$  ( $45 \mu g m^{-3}$ ) y  $PM_{10}$  ( $75 \mu g m^{-3}$ ) con base en la NOM-025-SSA1-2014.

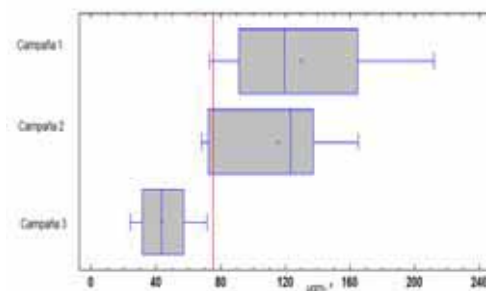
**Tabla 8: Resultados de las campañas realizadas en Jojutla.**

	A. Agroindustrial		A. Industrial		Sin actividad	
	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>10</sub>
<b>N días</b>	23	23	7	7	7	7
<b>Promedio</b>	83.35	129.8	75.08	115.41	20.48	43.58
<b>Desviación Estándar</b>	30.24	42.86	25.94	34.55	8.39	16.3
<b>Coefficiente de Variación</b>	36.28%	33.02%	34.56%	29.94%	40.98%	37.40%
<b>Mínimo</b>	41.44	73.25	38.76	68.19	8.76	24.31
<b>Máximo</b>	143.6	211.66	113.79	165.19	29.56	71.66
<b>Días por arriba de la norma</b>	15	12	6	5	2	0

En las Figuras 43 y 44 se muestra el grafico de caja y bigotes el promedio de partículas  $PM_{10}$  Y  $PM_{2.5}$  respectivamente durante las 5 campañas y el límite establecido por la NOM-025-SSA1-2014.



**Figura 43: Diagrama de caja y bigotes de Jojutla  $PM_{2.5}$ .**



**Figura 44: Diagrama de caja y bigotes de Jojutla  $PM_{10}$ .**

Se observa que las diferencias de las concentraciones de  $PM_{2.5}$  parecen ser muy distintas en ambos periodos, lo cual se corrobora al realizar la prueba de Mann-Whitney con una cola y un nivel de confianza del 95% (Anexo1).

#### 6.4 Análisis meteorológico

El régimen de estabilidad del viento durante los muestreos se mantuvo en Clase 'A', con velocidades de aire promedio de 0.94, 0.89, 0.93  $m\ s^{-1}$  para las campañas 1, 2 y 3 respectivamente. La dirección del viento presentó oscilaciones muy cambiantes (ver figuras 46,47 y 48) de tal manera que el viento dominante aplica solamente para una fracción del día (Tabla 9). Para conocer la dirección de los vientos se obtuvo la ubicación de la estación meteorológica (Figura 45).

Tabla 9: Datos meteorológicos durante el monitoreo.

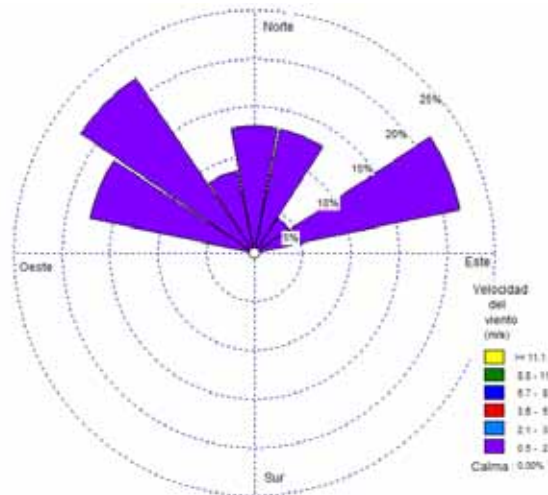
Campaña	Días	Precipitación(mm)	Velocidad (m/s)	Dirección (°)	Temperatura(°C)	Humedad Relativa (%)	Presión (mbar)
1	23	0.25	0.94	170	27	40	909
2	7	2.93	0.89	180	26	63	909
3	7	5.34	0.93	90	26	69	908



Figura 45: Ubicación de la estación meteorológica ESIME.

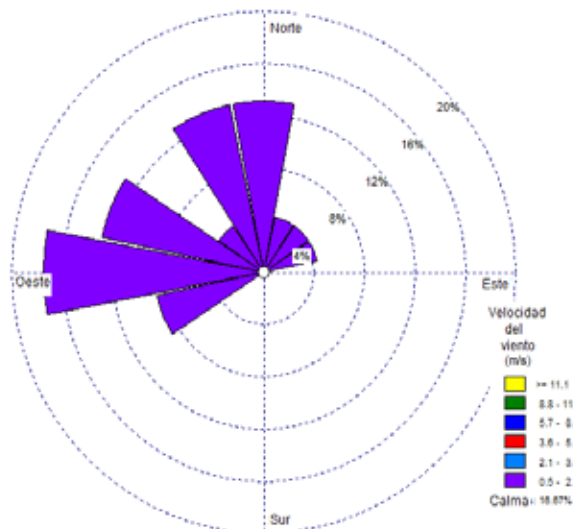
En las Figuras 46,47,48 se muestran las rosas de viento correspondiente a cada campaña, durante el análisis del comportamiento del viento se detectó que este fue muy variante durante todo el día.

En la Figura 46 el viento tiene dos direcciones predominante NO y otra NE, afectando la zonas cercanas al Ingenio y la localidad de San Nicolás de Galeana.



**Figura 46: Rosa de viento correspondiente al periodo de actividad agroindustrial.**

En la Figura 47 se muestra la rosa de viento que sopla hacia una direccion predominante O, afectando San Nicolas de Galeana.



**Figura 47: Rosa de viento correspondiente al periodo de actividad agroindustrial.**

En la figura 48 se muestra la rosa de viento que sopla hacia una direccion predominante al N afectando las zonas pobladas de Zacatepec de Hidalgo.

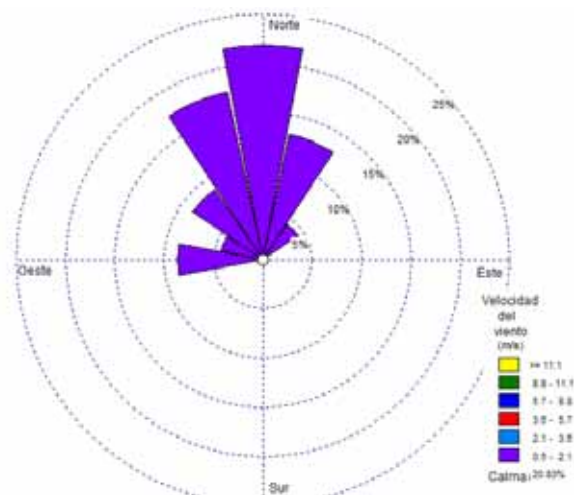


Figura 48: Rosa de viento correspondiente al periodo de actividad agroindustrial.

La tabla 10 muestra un resumen de los resultados obtenidos durante las campañas de monitoreo de partículas  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ , en los tres sitios de muestreo. Se observó que, durante la campaña 2 de actividad industrial, en los datos de Galeana se observó las concentraciones más altas comparado con los sitios de Jojutla y Zacatepec, aún cuando este sitio se encuentra más alejado del ingenio. Esto podría estar siendo ocasionado en mayor proporción por el aporte de las quemaduras y la dirección del viento, el cual predomina hacia el N y NO.

Tabla 10: Concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  en los tres sitios de muestreo.

Sitio	Campaña	$PM_{10}$ ( $\mu g m^{-3}$ )	DE	$PM_{2.5}$ ( $\mu g m^{-3}$ )	DE
Zacatepec	A. Agroindustrial	96.94	25.78	70.85	23.58
	A. Industrial	55.87	15.06	51.56	10.91
	Sin actividad	45.95	9.7	13.74	3.48
Jojutla	A. Agroindustrial	129.80	42.87	83.36	30.25
	A. Industrial	115.42	34.56	75.08	25.95
	Sin actividad	43.59	16.3	20.49	8.40
Galeana	A. Agroindustrial	124.62	62.03	64.48	43.93
	A. Industrial	165.62	72.45	61.35	30.69
	Sin actividad	38.54	16.3	15.024	7.24

## 6.5 Concentración Carbono negro (EC) y carbono orgánico(OC) en PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> , en Zacatepec y Jojutla, Morelos.

En las figuras 49, 50 y 51 se observa la concentración de aerosoles carbonáceos en PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en Zacatepec, Morelos.

Se recolectaron muestras durante los tres periodos: actividad agroindustrial, actividad industrial y sin actividad, se analizaron las muestras utilizando el equipo OC/EC Laboratory, el cual se basa en un principio termo-óptico de medición.

De la figura 49 a la 54 se observa las concentraciones de CE y OC en PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> de Zacatepec durante la actividad agroindustrial, industrial y sin actividad. En las cuales se puede ver que durante la actividad agroindustrial se tiene un aumento significativo de EC, OC y CT en comparación con la actividad industrial y sin actividad.

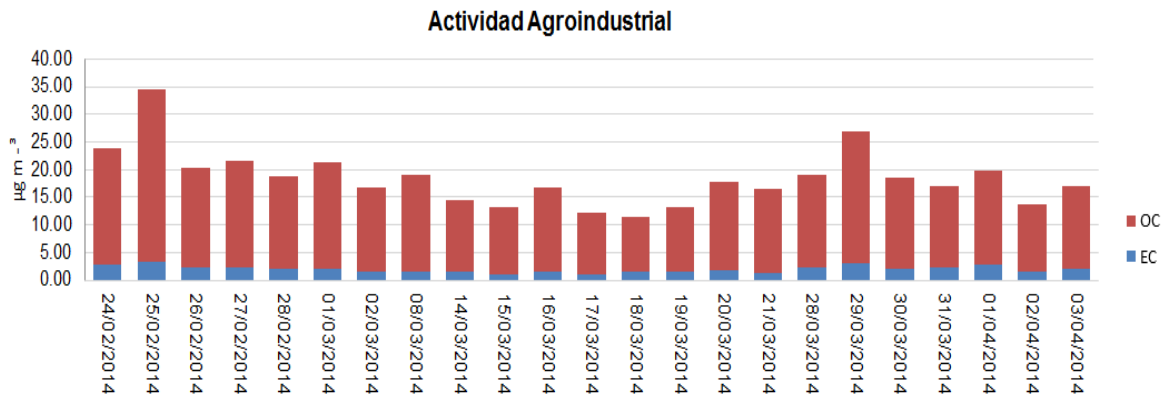


Figura 49. Concentración de EC y OC en PM<sub>2.5</sub> Zacatepec, Morelos.

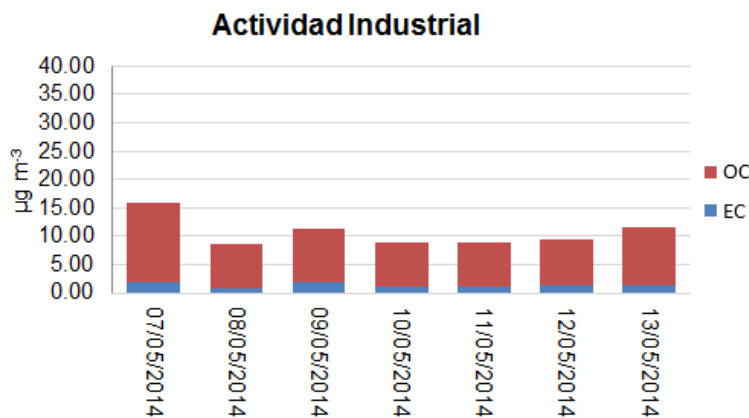


Figura 50 : Concentración de EC y OC en PM<sub>2.5</sub> Zacatepec, Morelos.

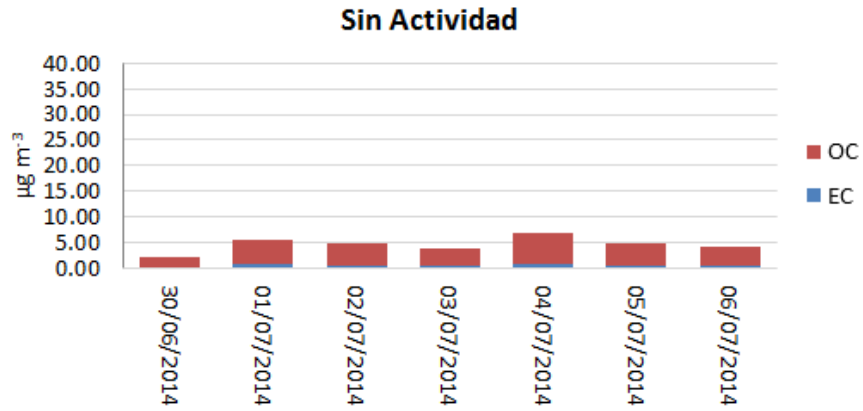


Figura 51: Concentración de EC y OC en PM<sub>2.5</sub> Zacatepec, Morelos.

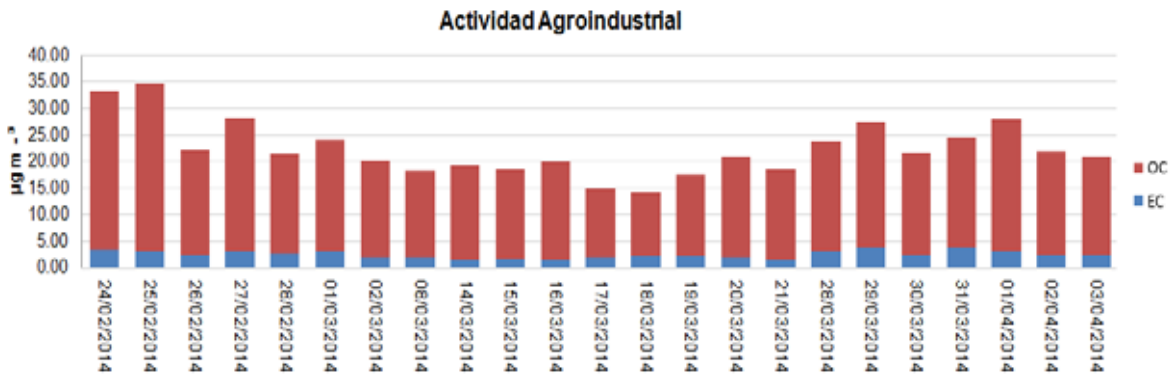


Figura 52: Concentración de EC y OC en PM<sub>10</sub> Zacatepec, Morelos.

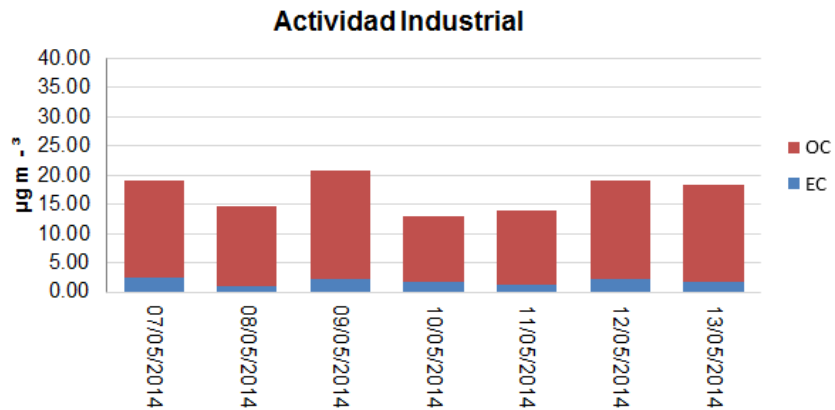


Figura 53: Concentración de EC y OC en PM<sub>10</sub> Zacatepec, Morelos.



Figura 54: Concentración de EC y OC en PM<sub>10</sub> Zacatepec, Morelos.

En la tabla 11 se observan los resultados obtenidos de estadística básica como: concentración promedio, concentración máxima y mínima de EC, OC, CT en PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en tres periodos con actividad agroindustrial, con actividad industrial y sin actividad en Zacatepec.

Zacatepec																		
	Actividad Agroindustrial						Actividad Industrial						Sin Actividad					
	PM <sub>2.5</sub>			PM <sub>10</sub>			PM <sub>2.5</sub>			PM <sub>10</sub>			PM <sub>2.5</sub>			PM <sub>10</sub>		
	EC	OC	CT	EC	OC	CT	EC	OC	CT	EC	OC	CT	EC	OC	CT	EC	OC	CT
Promedio (µg m <sup>-3</sup> )	1.96	16.45	18.42	2.50	19.9	22.36	1.37	9.31	10.68	1.81	15.2	17	0.44	4.09	4.54	0.67	8.65	9.32
Max (µg m <sup>-3</sup> )	3.33	31.07	34.41	3.81	31.5	35.34	1.96	14	15.96	2.45	18.6	21	0.80	6.04	6.83	1.04	10.5	11.53
Min (µg m <sup>-3</sup> )	0.94	9.3	10.68	1.40	11.9	13.29	0.94	7.79	8.735	1.09	11.4	12.5	0.08	2.15	2.23	0.41	6.68	7.08
σ (µg m <sup>-3</sup> )	0.64	4.58	5.21	0.73	4.69	5.426	0.40	2.24	2.646	0.84	5.13	5.96	0.23	1.18	1.41	0.87	6.09	6.95

Tabla 11: Análisis estadístico de EC, OC Y CT en PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en Zacatepec.

De la figura 55 a la 58 se observa los diagramas de caja y bigote en donde se puede observar las concentraciones promedio las de EC y OC en PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> de Zacatepec durante la actividad agroindustrial, industrial y sin actividad.



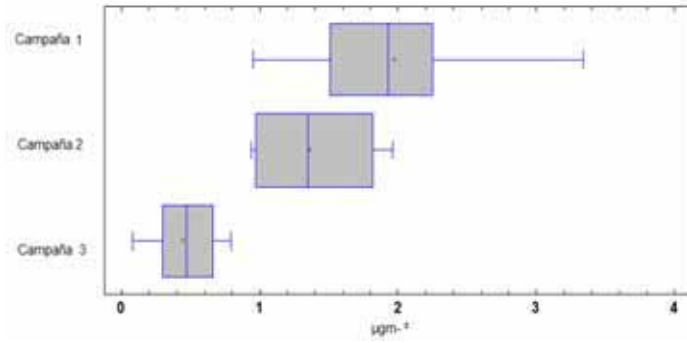


Figura 55:Diagrama de caja y bigotes de Zacatepec EC PM<sub>2.5</sub>.

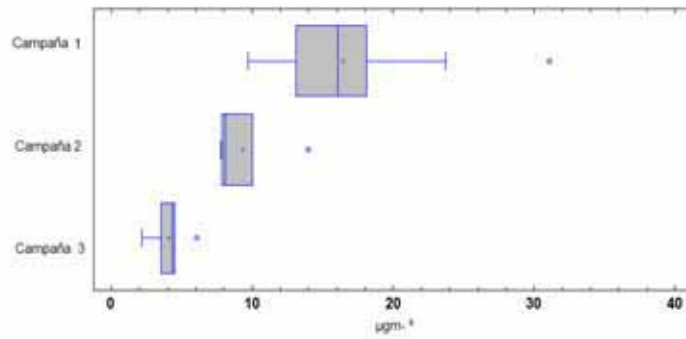


Figura 56:Diagrama de caja y bigotes de Zacatepec OC PM<sub>2.5</sub>.

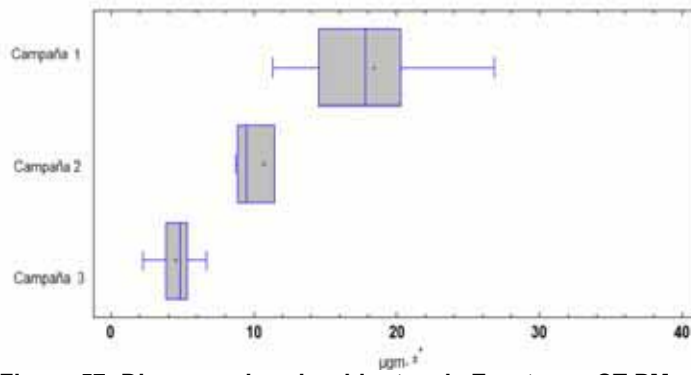


Figura 57: Diagrama de caja y bigotes de Zacatepec CT PM<sub>2.5</sub>.

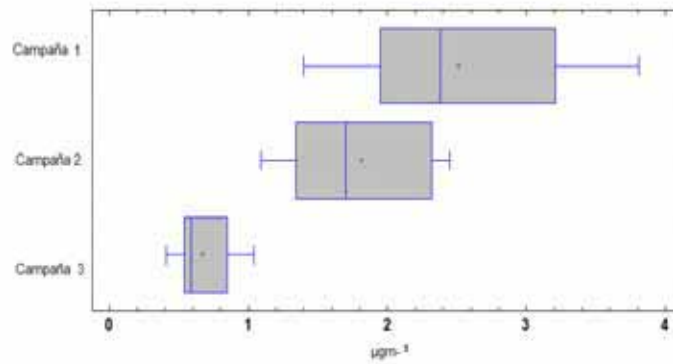


Figura 58:Diagrama de caja y bigotes de Zacatepec EC PM<sub>10</sub>.

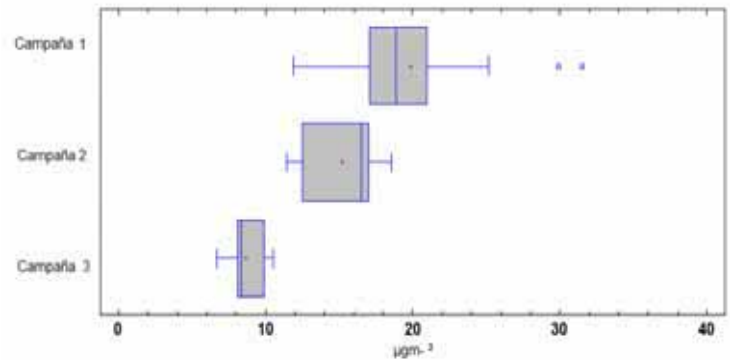


Figura 59: Diagrama de caja y bigotes de Zacatepec OC PM<sub>10</sub>.

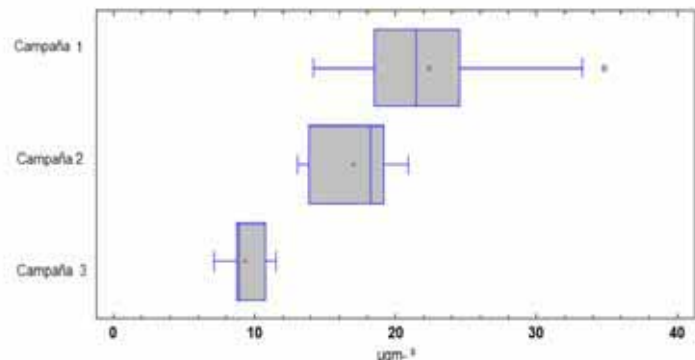


Figura 60: Diagrama de caja y bigotes de Zacatepec CT PM<sub>10</sub>.

En la figuras 61a la 66 se observa el diagrama de cajas y bigotes de especies carbonáceas, se observa que durante la actividad agroindustrial las concentraciones de EC, OC Y CT se encuentran por arriba de la época de ausencia de actividad tanto en PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>. Con la prueba de Mann-Whitney (Anexo 2) se corroboró lo anterior ya que se concluye que en la mayoría de los casos se rechaza la hipótesis nula (H<sub>0</sub>), por lo que, existe evidencia significativa para decir que la quema de biomasa como parte del proceso agrícola propicia un aumento considerable en la concentración de aerosoles de carbono elemental y orgánico en Zacatepec.

De la figura 61 a la 64 se observan las concentraciones de CE y OC en PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> de Zacatepec durante la actividad agroindustrial, industrial y sin actividad.

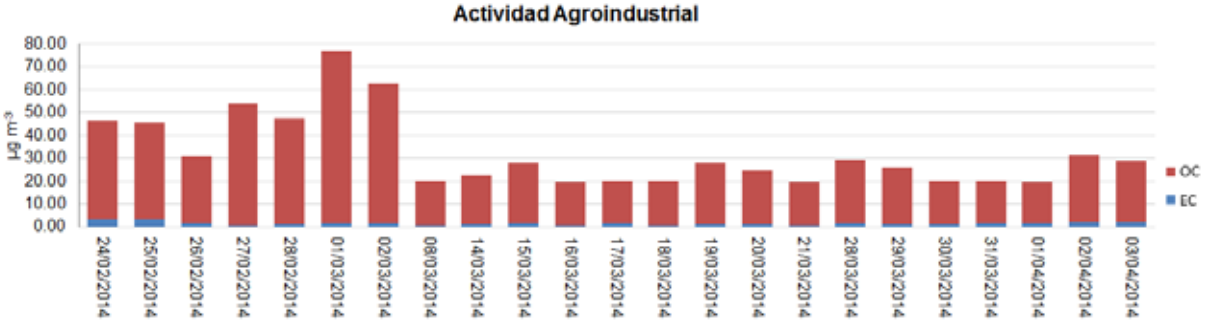


Figura 61: Concentraciones de EC y OC en PM<sub>2.5</sub> Jojutla, Morelos.

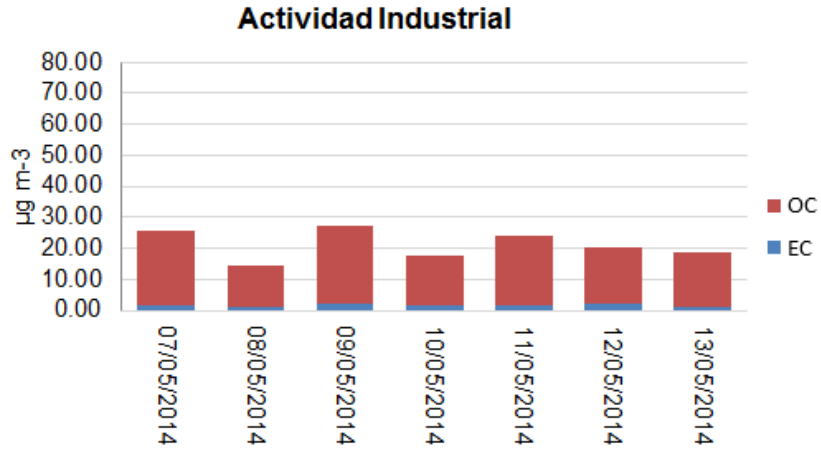


Figura 62: Concentraciones de EC y OC en PM<sub>2.5</sub> Jojutla, Morelos.



Figura 63: Concentraciones de EC y OC en PM<sub>2.5</sub> Jojutla, Morelos.

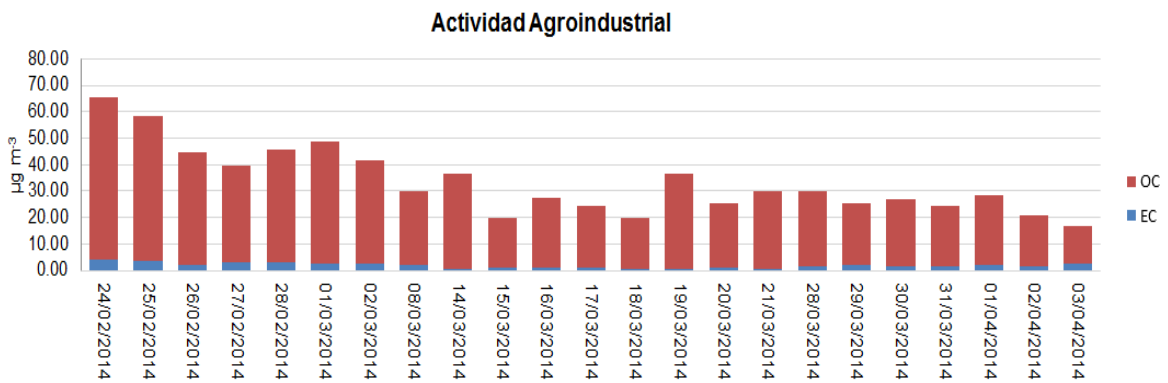


Figura 64: Concentraciones de EC y OC en PM<sub>10</sub> Jojutla, Morelos.

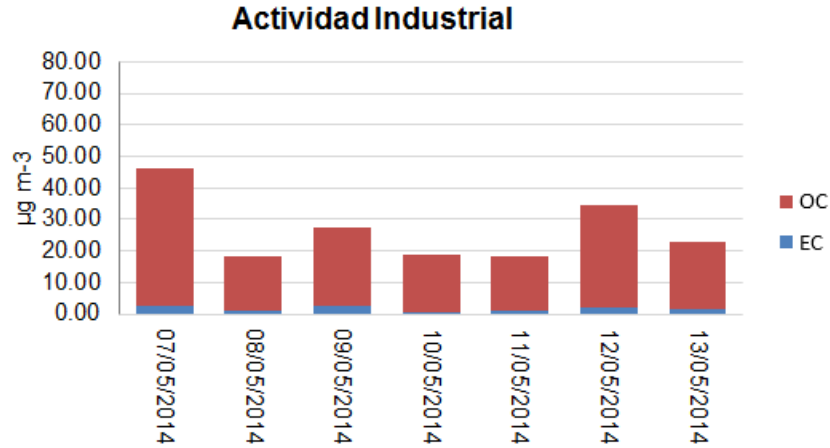


Figura 65: Concentraciones de EC y OC en PM<sub>10</sub> Jojutla, Morelos.



Figura 66: Concentraciones de EC y OC en PM<sub>10</sub> Jojutla, Morelos.

El aumento en la concentración de EC en PM<sub>2.5</sub> durante la actividad agroindustrial en comparación con la de sin actividad es de 3.3 veces mayor y de PM<sub>10</sub> es de 2.3 veces mayor.

El comportamiento en la concentración de OC en PM<sub>2.5</sub> durante la actividad agroindustrial en comparación con la de sin actividad es de 3.3 veces mayor y de PM<sub>10</sub> es de 1.9 veces mayor.

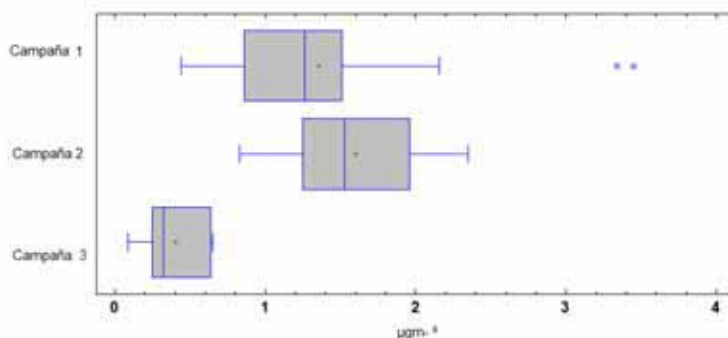
El aumento en la concentración de EC y OC en PM<sub>2.5</sub> durante la actividad agroindustrial es 0.84 y 1.6 veces mayor que en la actividad industrial. El aumento en la concentración de EC y OC en PM<sub>10</sub> durante la actividad agroindustrial es 1.1 y 1.6 veces mayor que en la actividad industrial, esto indica que la quema de biomasa aumenta la cantidad de carbono elemental.

En la tabla 12 se observan los resultados obtenidos de estadística básica como: concentración promedio, concentración máxima y mínima de EC, OC, CT en PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en tres periodos con actividad agroindustrial, con actividad industrial y sin actividad en Zacatepec.

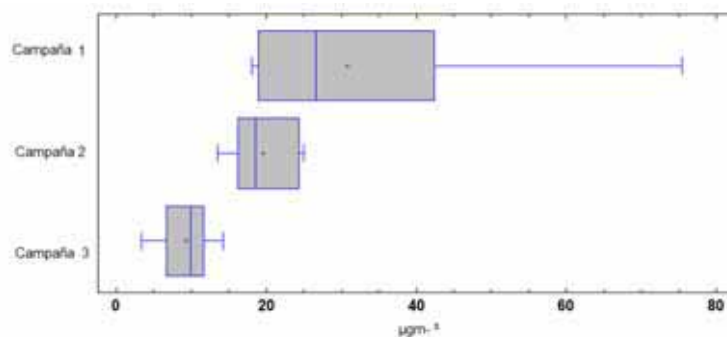
**Tabla 12: Análisis estadístico de EC, OC Y CT en PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en Jojutla.**

Jojutla																		
	Actividad Agroindustrial						Actividad Industrial						Sin Actividad					
	PM 2.5			PM10			PM 2.5			PM10			PM 2.5			PM10		
	EC	OC	CT	EC	OC	CT	EC	OC	CT	EC	OC	CT	EC	OC	CT	EC	OC	CT
Promedio (µg m-3)	1.35	30.79	32.15	1.829	31.5	33.34	1.60	19.55	21.15	1.587	25	26.6	0.40	9.24	9.64	0.78	16.79	17.57
Max (µg m-3)	3.45	75.37	78.82	4.135	61.5	65.59	2.35	24.95	27.31	2.607	43.5	46.1	0.65	14.26	14.91	1.60	20.43	22.03
Min (µg m-3)	0.44	18.10	18.54	0.623	14.2	14.81	0.83	13.52	14.35	0.762	17.1	17.8	0.09	3.41	3.51	0.36	14.17	14.53
σ (µg m-3)	0.78	15.53	16.30	0.967	12	12.98	0.50	4.30	4.81	0.764	9.82	10.6	0.23	3.51	3.74	0.42	2.20	2.61

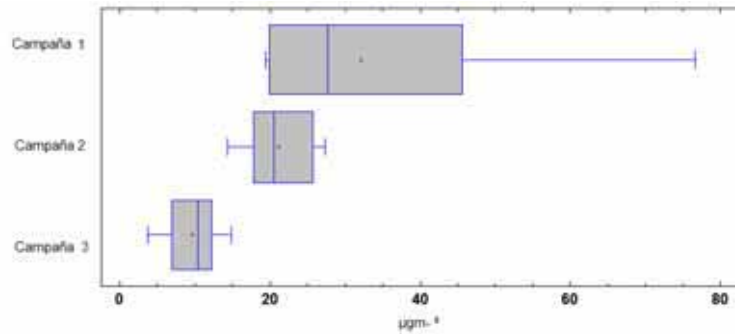
De la Figura 67 a la 72 se presentan los diagramas de cajas y bigotes de especies carbonáceas, se observa que durante la actividad agroindustrial las concentraciones de EC y OC se encuentran por arriba de la época de ausencia de actividad tanto en PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>. Con la prueba de Mann-Whitney (Anexo 2) se corroboró lo anterior ya que se concluye que en la mayoría de los casos se rechaza la hipótesis nula (H<sub>0</sub>) por lo que, existe evidencia significativa para decir que la quema de biomasa como parte del proceso agrícola propicia un aumento considerable en la concentración de aerosoles de carbono elemental y orgánico en Jojutla.



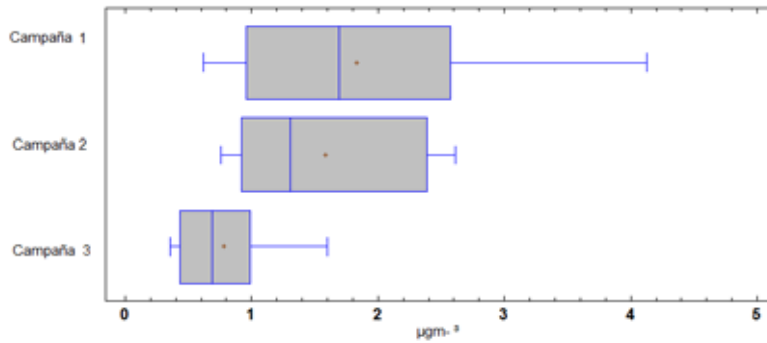
**Figura 67: Diagrama de caja y bigotes de Jojutla EC PM<sub>2.5</sub>.**



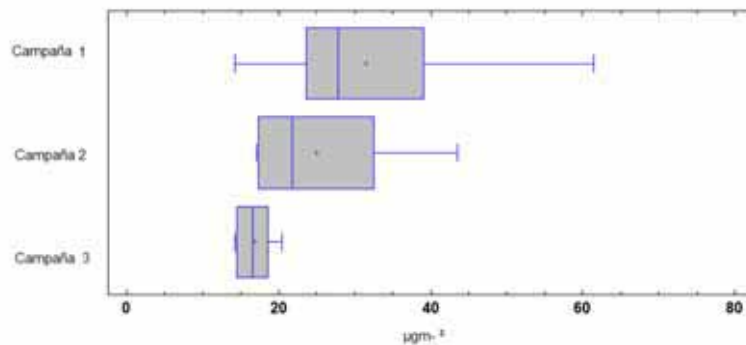
**Figura 68: Diagrama de caja y bigotes de Jojutla OC PM<sub>2.5</sub>.**



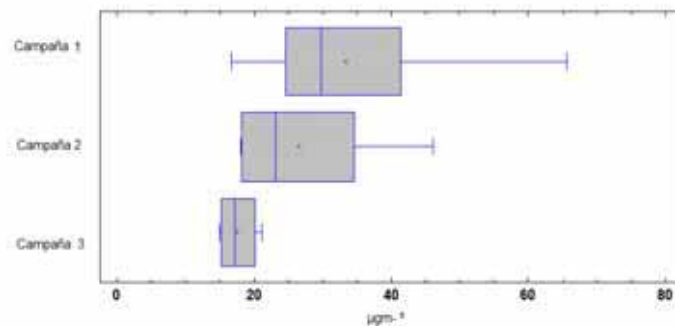
**Figura 69: Diagrama de caja y bigotes de Jojutla CT PM<sub>2.5</sub>.**



**Figura 70: Diagrama de caja y bigotes de Jojutla EC PM<sub>10</sub>.**



**Figura 71: Diagrama de caja y bigotes de Jojutla OC PM<sub>10</sub>.**



**Figura 72: Diagrama de caja y bigotes de Jojutla CT PM<sub>10</sub>.**

## 6.6. Resultados del modelado de dispersión Gaussiana

La figuras 73,74,75 y 76 muestran el resultado de la calibración del modelo gaussiano para  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  tomando como referencia los resultados del monitoreo en Zacatepec durante la actividad agroindustrial y la actividad industrial. Las concentraciones de fondo se determinaron con base en los resultados de la campaña 3 (sin actividad). Se observan diferencias entre las concentraciones modeladas respecto a las medidas en campo, en los primeros dos días de la campaña. Estas diferencias pueden asociarse al impacto de quemas realizadas esos días. También se observa las excedencias significativas de los límites establecidos por la NOM-025-SSA1-2014 durante todos los días de la campaña, tanto en  $PM_{10}$  como en  $PM_{2.5}$ .

Para la aplicar el modelo de dispersión Gaussiana se obtuvieron los datos proporcionados por la Estación Sinóptica Meteorológica 76729 ubicada en Zacatepec, Morelos con las siguientes coordenadas: Longitud:  $99^{\circ}12'26''$ , Latitud  $18^{\circ}38'39''$  y una Altitud de 910, estación con la cual se realiza el monitoreo atmosférico de la zona y que es parte del Servicio Meteorológico Nacional de Redes de Estaciones Sinópticas Meteorológicas ESIME.

Para tener un modelo más aproximado se pidió al Ingenio Fideicomiso Emiliano Zapata los datos de calderas de lo cual se realizó una suma en la tasa de emision e partículas, posteriormente se obtuvo promedio de la altura, diámetro de la chimenea, velocidad de flujo de gases, temperatura de salida de los gases y presión.

La estabilidad atmosférica se calculó con la velocidad del viento (Tabla 2). Para determinar la concentración de partículas se aplicó la ecuación de Sutton (ecuación 4.7), posteriormente aplicando la ecuación de Holland ecuación (4.8) para determinar la altura de la chimenea.

Para ajustar los datos se lleva a cabo una calibración muestra el resultado de la calibración del modelo gaussiano para  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  tomando como referencia los resultados del monitoreo en Zacatepec durante la campaña 1 y 2. Las concentraciones de fondo se determinaron con base en los resultados de la campaña 3 (sin actividad). Se observan diferencias entre las concentraciones modeladas respecto a las medidas en campo, en los primeros dos días de la campaña. Estas diferencias pueden asociarse al impacto de quemas realizadas esos días. Como se puede observar en la Figura 74 y 75 ocurren excedencias significativas de los límites establecidos por la NOM-025-SSA1-2014 durante todos los días de la campaña, tanto en  $PM_{10}$  como en  $PM_{2.5}$ .

Como se observa en la Figura 73 el modelado de las partículas está muy por debajo del valor medido de partículas  $PM_{2.5}$ , en comparación con la Figura 74, el modelado se ajusta a los valores medidos, sin embargo siguen habiendo diferencias significativas y esto se debe a la aportación que tienen las quemas y al valor de la velocidad terminal y la consideración de la proporción de  $PM_{2.5}$  en PST.

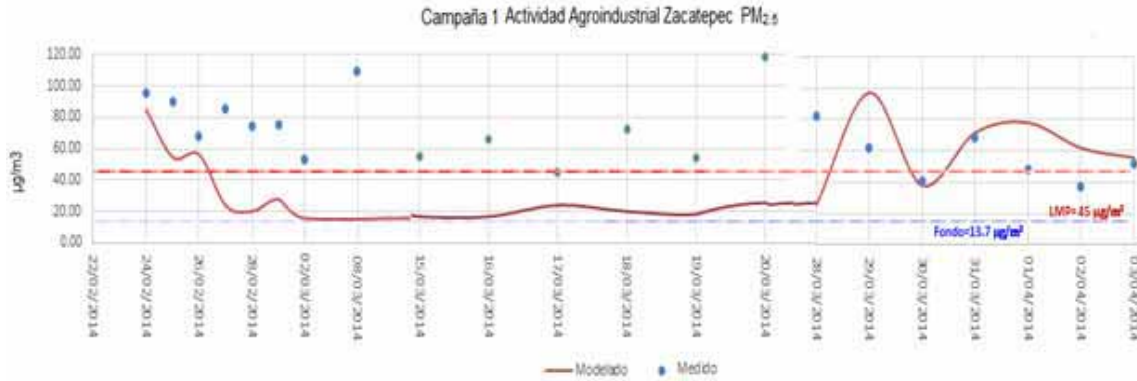


Figura 73: Ajuste de modelo Gaussiano con datos medidos de PM<sub>2.5</sub>.

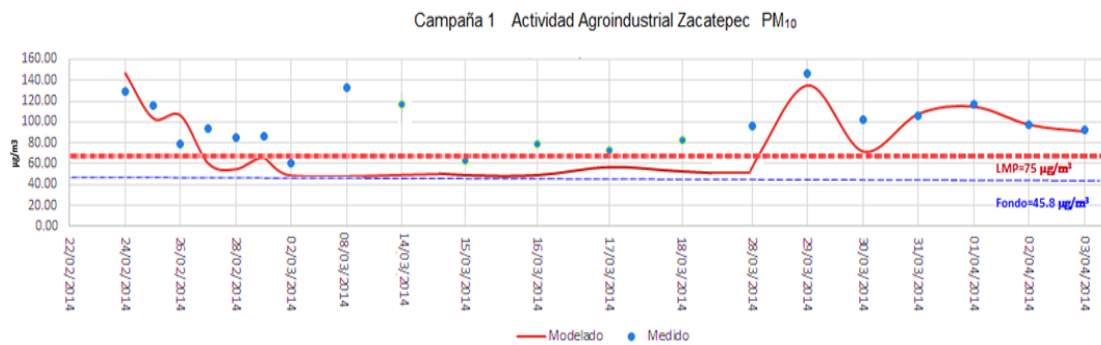


Figura 74: Ajuste de modelo Gaussiano con datos medidos de PM<sub>10</sub>.

Como se observa en las Figuras 75 y 76 el modelado de las partículas está muy por debajo del valor medido de partículas PM<sub>2.5</sub>, en comparación con las Figuras 73 y 74, el modelado se ajusta a los valores medidos, sin embargo siguen habiendo diferencias significativas y esto se debe a que no se conoce las propiedades de las partículas como la velocidad terminal que varía de acuerdo al tipo de partícula.

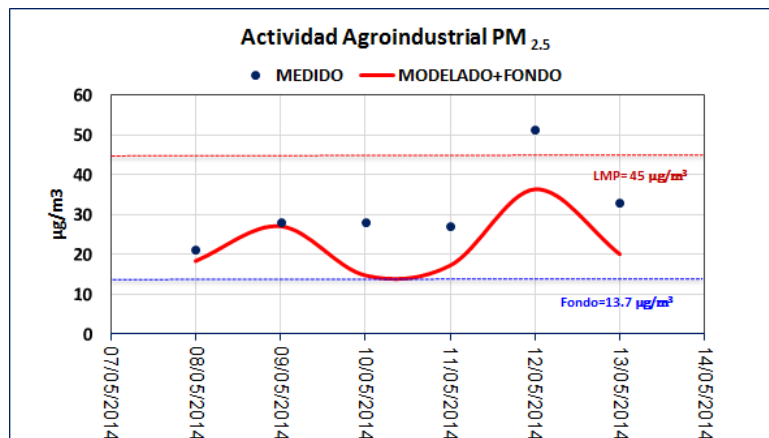


Figura 75: Ajuste de modelo Gaussiano con datos medidos de PM<sub>2.5</sub>.



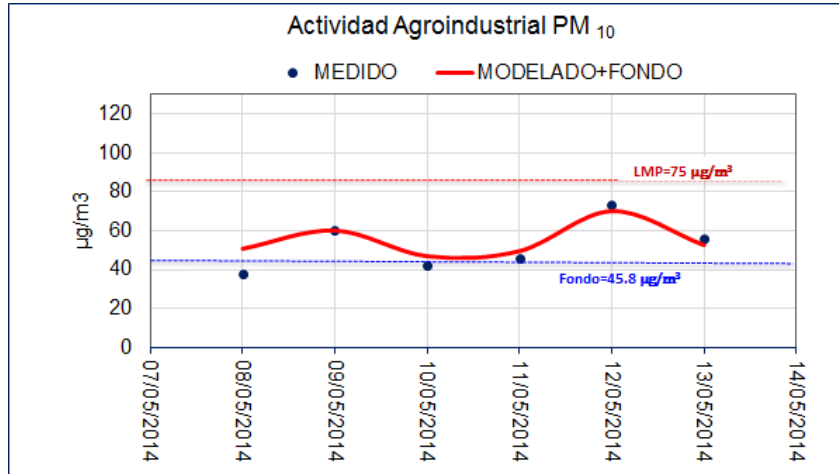


Figura 76: Ajuste de modelo Gaussiano con datos medidos de PM<sub>10</sub>.

De la Figura 77 a la 80 muestra los perfiles de concentración donde la máxima concentración para cada medición se encuentra a menos de 1 km de la fuente, excediendo significativamente los límites establecidos por la NOM-025-SSA1-2014 durante todos los días de la campaña, tanto en PM<sub>10</sub> como en PM<sub>2.5</sub>.

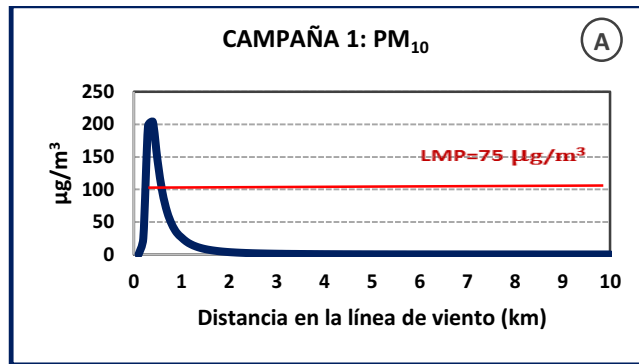


Figura 77: Ajuste de modelo Gaussiano con datos medidos de PM<sub>10</sub>.

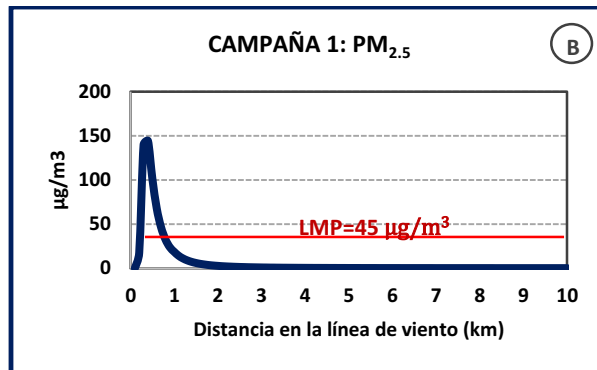


Figura 78: Ajuste de modelo Gaussiano con datos medidos de PM<sub>2.5</sub>

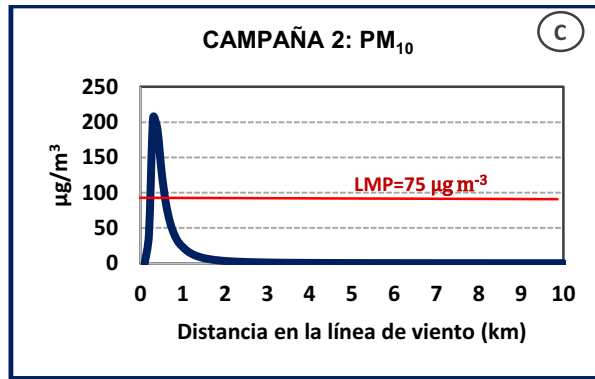


Figura 79: Ajuste de modelo Gaussiano con datos medidos de PM<sub>10</sub>.

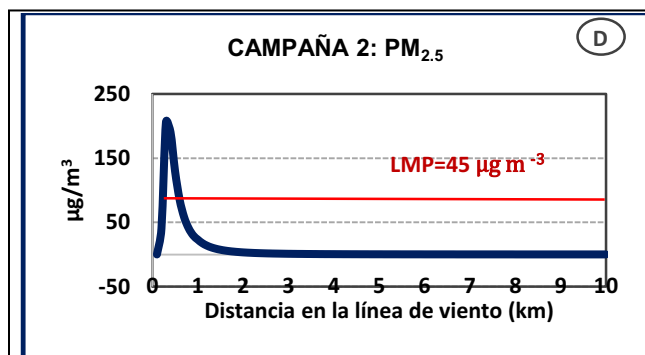


Figura 80: Ajuste de modelo Gaussiano con datos medidos de PM<sub>2.5</sub>

En las Figuras 81 y 82 se muestra la concentración de partículas PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> respectivamente así como las zonas de impacto por las emisiones provenientes del Ingenio.

En la Figura 81 se puede apreciar el comportamiento de la dispersión de las partículas y la concentración de entre 20 y 45 µg m<sup>-3</sup> cercana al Ingenio, sin embargo en el Palacio Municipal en Zacatepec se muestra una concentración mayor 45 µg m<sup>-3</sup>, con lo cual se corrobora que los datos medidos con mayor concentración, en el punto de muestreo se debe a las emisiones que aportan el ingenio.

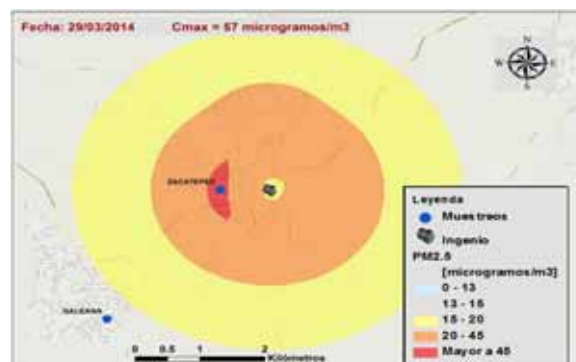


Figura 81: Concentraciones de PM<sub>2.5</sub> con Modelado Gaussiano.

En la Figura 82 se puede apreciar el comportamiento de la dispersión de las partículas cuando se tiene variación en la dirección del viento.

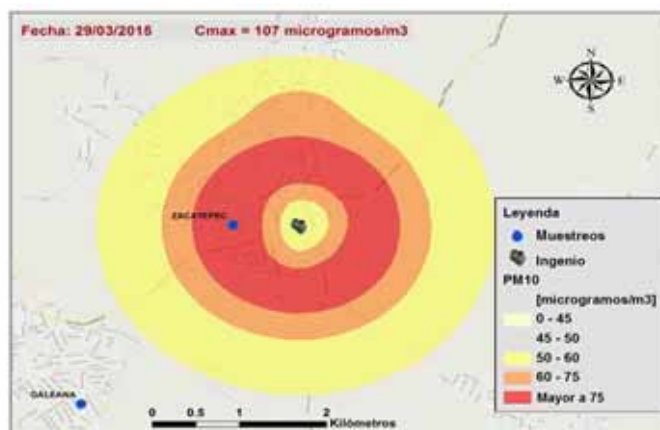


Figura 82: Concentraciones de PM<sub>10</sub> con Modelo Gaussiano.

## 6.7 Modelado de la dispersión de partículas por la quema

En la región cañera del Estado de Morelos se efectuaron 676 quemas durante el periodo de zafra 2013-2014. Con dicha actividad se generaron cuantiosas emisiones de partículas que incidieron en zonas pobladas cercanas a las franjas de cañaverales. Para estimar y visualizar las zonas más impactadas con altas concentraciones de partículas se modeló la dispersión de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> por el Modelo Gaussiano apoyándonos de un Sistema de Información Geográfica denominado ArcGIS ® para automatizar los procesos.

Para el modelado de la dispersión de partículas se alimentó una base de datos que incluye el área quemada y las condiciones meteorológicas (temperatura, velocidad y dirección del viento y humedad relativa) la cual se obtuvo de la información reportada por la estación meteorológica ESIME Zacatepec.

La herramienta desarrollada para el modelado se estructuró en cuatro secciones:

### Sección 1: Parámetros de entrada:

Los datos de entrada que se consideraron para el modelo se integraron en una capa (shapefile) que con la siguiente información:

- Mapa de quemas (Fecha, hora y ubicación de las quemas)
- Estabilidad (igual a 1 para todos los casos de acuerdo a la meteorología reportada por la estación)
- Velocidad del viento
- Altura del receptor z (1.7 m)
- Velocidad terminal de sedimentación de las partículas  $0.0003 \text{ m s}^{-1}$

## Sección 2 Cálculos sobre la fuente:

En esta sección se consideró una velocidad de propagación de  $30 \text{ min ha}^{-1}$ , lo que equivalió a  $V_p=0.18 \text{ s m}^{-2}$ . Se Aplicaron las ecuaciones 4.11 y 4.12 de cálculo de tiempo de quema y de cálculo de biomasa quemada por unidad de área.

Para el cálculo de calor sensible se aplicó la ecuación 4.13:

Se obtuvo:

$$Q_H=323.94 \text{ Mw}$$

Se tomó del Modelo V-Smoke Lavdas (1996) para estimar el flux ecuación (4.14) y la altura de las plumas ecuación (4.15).

Se obtuvo:

$$F= 2851.44 \text{ m}^4 \text{ s}^{-3}$$

$$H_{\text{FNUS}}=10378 \text{ m}$$

Por último se utiliza un iterador con el cual se automatiza el cálculo para todas las parcelas (Figura 83).

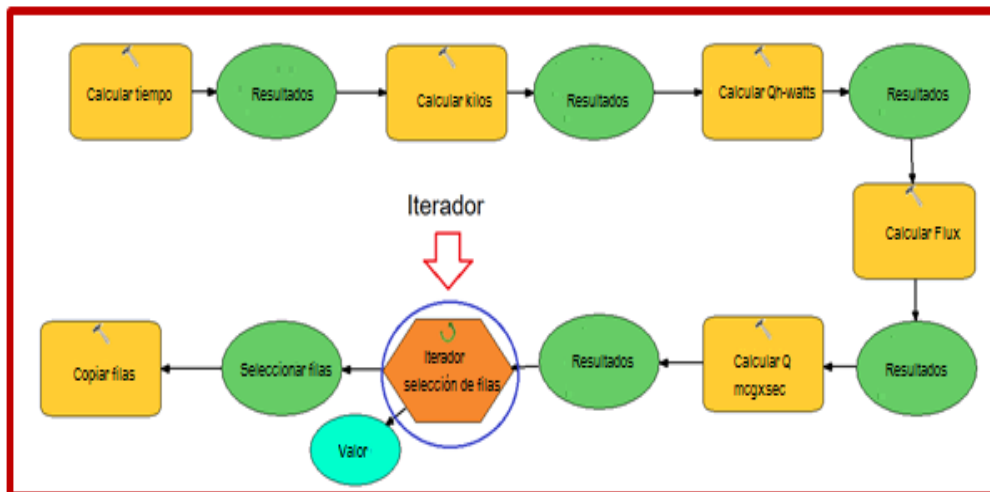


Figura 83: Esquema de cálculos sobre la fuente e iterador.

### Sección 3: Modelado de la dispersión Gaussiana.

Se construyó un malla con las siguientes coordenadas: en origen comenzando por el punto inferior izquierdo latitud: 2056000 metros, longitud: 472 000 metros a un punto de termino superior derecho latitud: 472000 metros, longitud 2 056 010, 200 celdas en la dirección horizontal y 200 celdas en dirección vertical. El tamaño físico de las celdas fue de 100 metros por 100 metros, resultando un dominio de 20 km en el sistema de coordenadas proyectado UTM WGS 1984, zona 14 (Figura 85).

En la Figura 84 se muestra la distribución de las parcelas, la cual se tomó de referencia para conocer el dominio de la malla para cubrir el área de estudio.

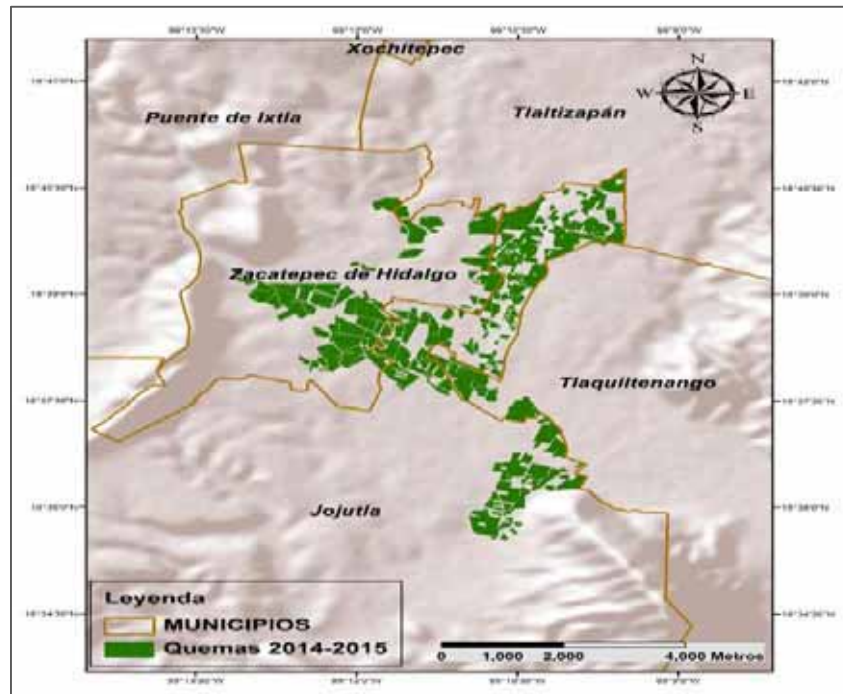


Figura 84: Se muestra el esquema de la ubicación de parcelas quemadas zafra 2013-2014

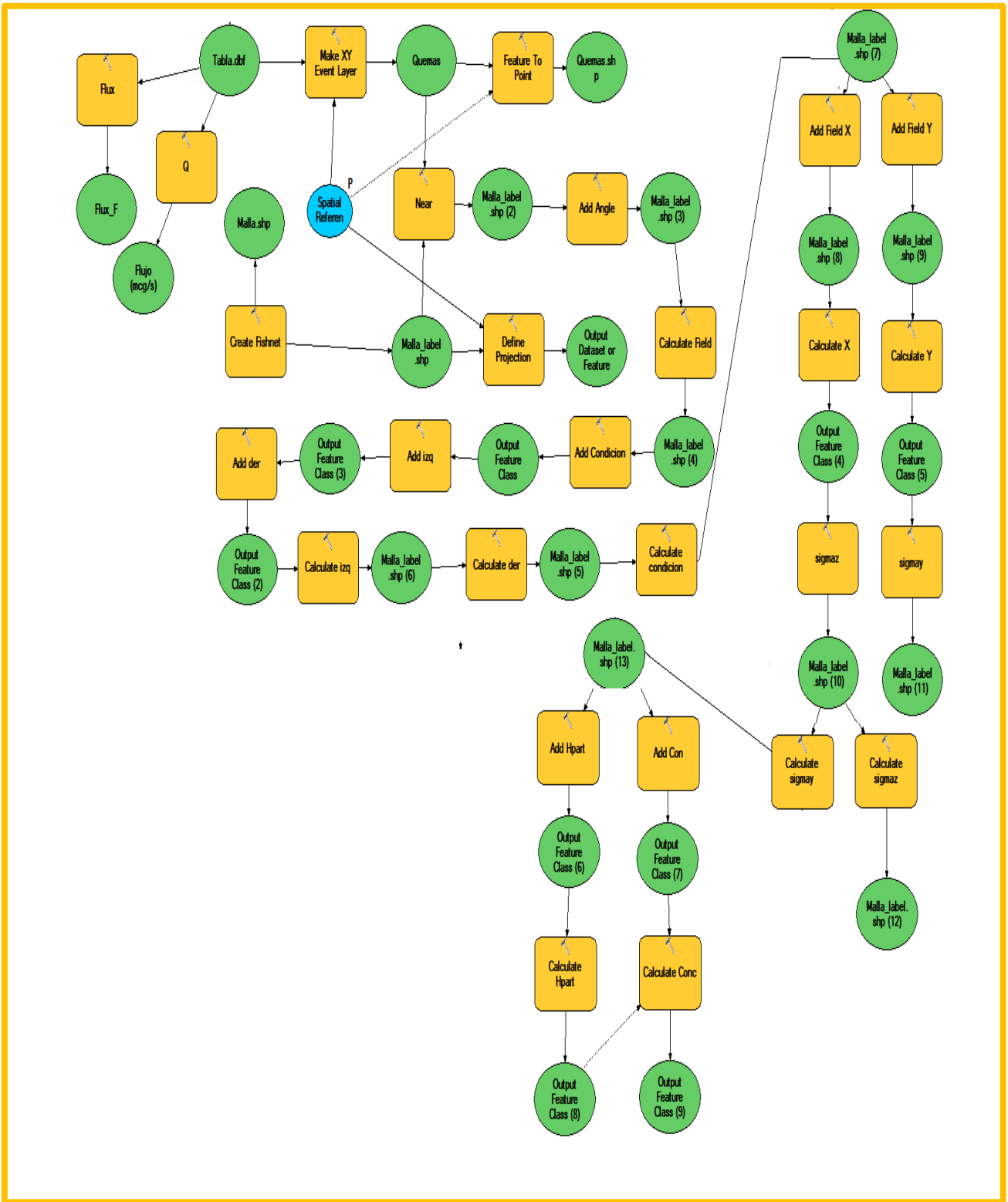


Figura 85: Esquema del modelo, cálculos sobre la malla.

#### Sección 4 .Superficies de interpolación:

Las superficies de interpolación se construyeron aplicando el método geo-estadístico Kriging que auto-correlaciona los valores modelados y realiza una predicción estimando los valores en donde la concentración no es conocida (Figura 86).

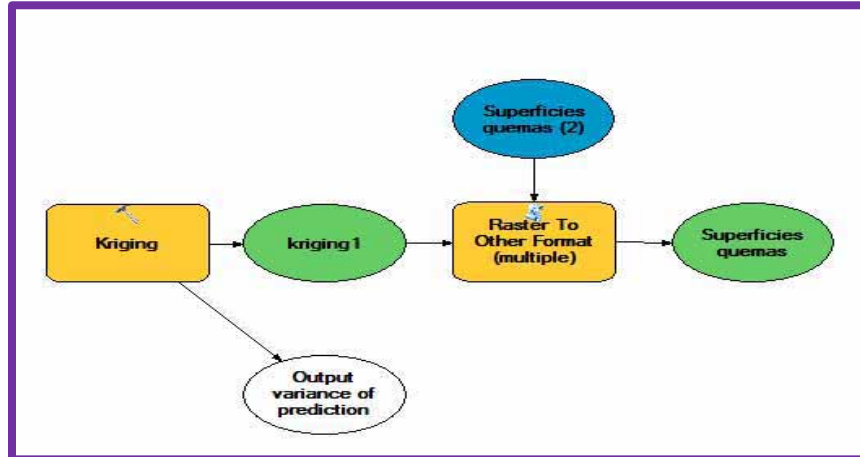


Figura 86: Esquema de creación de superficies de interpolación

En la tabla 13 se presenta los datos de número de eventos, cantidad de parcelas quemadas, área, velocidad y dirección del viento, fecha y hora en que se realizaron las quemas.

Se quemaron 676 parcelas reunidas en 26 eventos ocurridos de forma intermitente en fechas que van del 21-Nov-2013 al 10-Mayo-2014 y que corresponden a la zafra 2013-2014.

La recopilación de datos en especial la localización de las parcelas de la zafra 2013/2014 proporcionadas por el ingenio se considera una parte relevante en esta fase de la investigación.

- Tamaño de parcela
- Ubicación de las parcelas
- Calendario de quemas

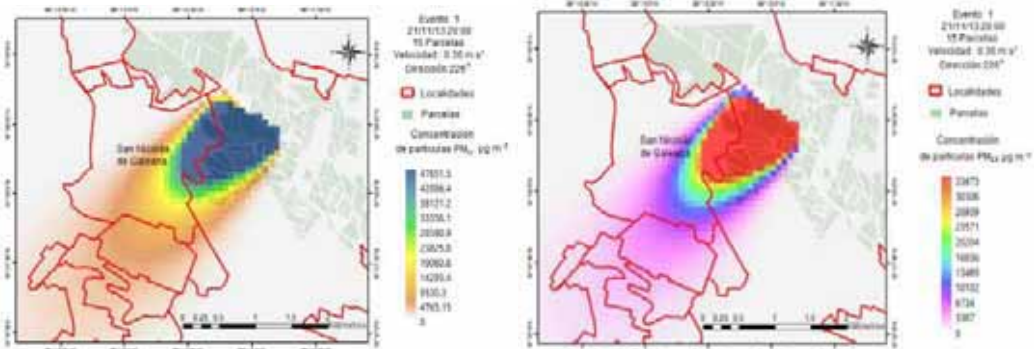
Tabla 13: Información de quemas prescritas zafra 2013/2014

No. Evento	Cantidad de Parcelas	Área (ha)	Fecha	Hora	Velocidad del Viento (m s <sup>-1</sup> )	Dirección (°)
1	15	19.4	21/11/2013	20:00	0.36	226
2	32	56.5	21/11/2013	14:00	0.36	226
3	3	4.1	22/11/2013	13:00	0.40	262
4	35	44.7	23/11/2013	13:00	0.35	206
5	30	38.2	27/11/2013	16:00	0.46	118
6	5	4.5	29/11/2013	14:00	0.28	150
7	26	31.6	30/11/2013	11:00	0.26	53
8	16	24.8	01/12/2013	20:00	0.81	133
9	4	6.0	02/12/2013	17:00	0.80	133
10	111	114.3	03/12/2013	10:00	0.81	133
11	40	56.2	07/12/2013	11:00	0.81	133
12	20	32.4	14/12/2013	10:00	0.66	171
13	31	73.4	17/12/2013	09:00	0.69	122
14	27	28.9	22/12/2013	22:00	0.67	107
15	49	98.7	25/12/2013	17:00	0.77	119
16	37	54.8	10/01/2014	10:00	0.62	115
17	21	26.1	23/01/2014	22:00	0.65	138
18	20	31.6	28/01/2014	10:00	0.73	138
19	25	36.7	04/02/2014	04:00	0.70	127
20	17	15.2	10/02/2014	04:00	0.67	155
21	16	22.5	17/02/2014	22:00	0.71	281
22	45	96.0	03/03/2014	22:00	0.91	162
23	8	13.6	21/03/2014	10:00	1.16	239
24	30	41.0	22/03/2014	08:00	0.77	188
25	7	10.5	10/05/2014	20:00	0.78	115



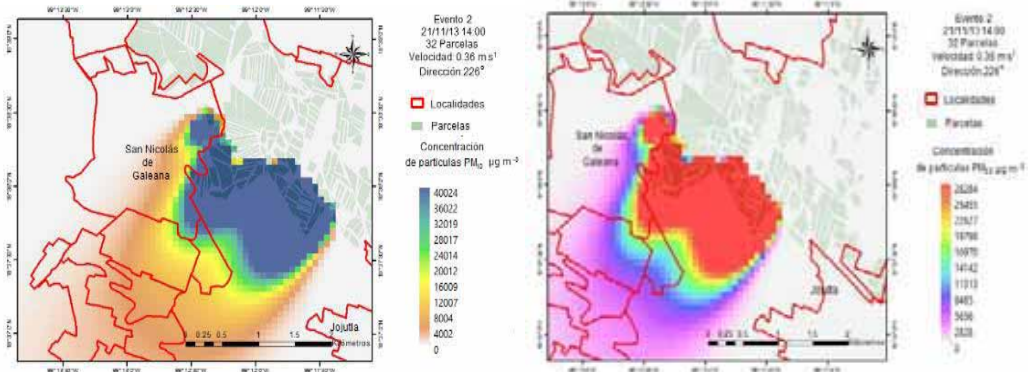
De la Figura 87 a la 111 se muestran las superficies de interpolación de cada evento:

En la Figura 87 se puede observar la afectación en la comunidad de San Nicolás de Galeana en las colonias de Josefa Ortiz de Domínguez, Lázaro Cárdenas y Centro por concentraciones de  $PM_{10}$  que pueden ir de 4 765 a 47 651  $\mu g m^{-3}$  y por concentraciones de  $PM_{2.5}$  que pueden ir 3 367 a 33 673 de  $\mu g m^{-3}$ , afectando alrededor de 740 habitantes.



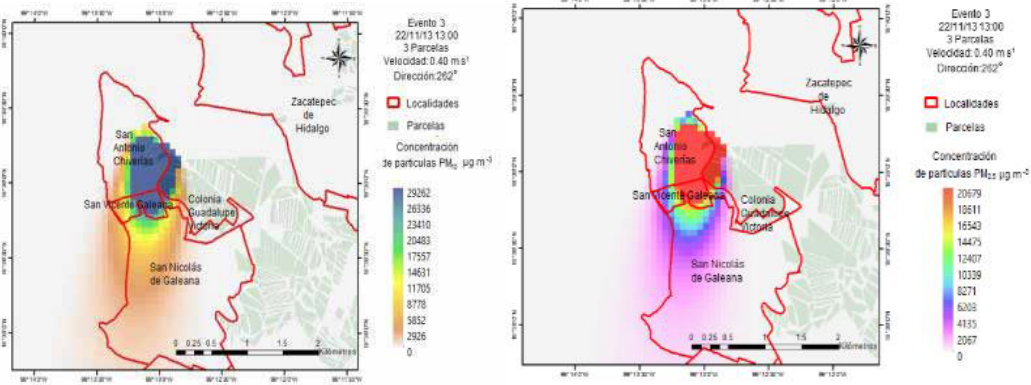
**Figura 87: Modelado de la concentración de partículas  $PM_{10}$  (izquierda) y  $PM_{2.5}$  (derecha), de las quemas del día 21/11/13 a las 20:00 h.**

En la Figura 88 se puede ver la afectación en la comunidad de San Nicolás de Galeana en las colonias Josefa Ortiz de Domínguez así como la afectación de la localidad de Jojutla en la comunidad los Pilares por concentraciones de  $PM_{10}$  que pueden ir de 4 002 a 40 024  $\mu g m^{-3}$  y de  $PM_{2.5}$  que pueden ir de 2 828 a 28 284  $\mu g m^{-3}$ , afectando cerca de 742 habitantes.



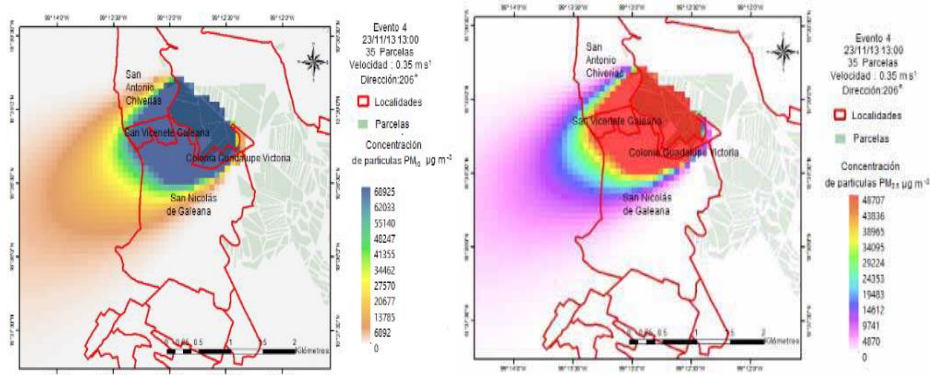
**Figura 88: Modelado de la concentración de partículas  $PM_{10}$  (izquierda)  $PM_{2.5}$  (derecha), de las quemas del día 21/11/13 a las 20 h.**

A comparación de la Figura 89 en la Figura 90 se puede observar la afectación en la comunidades de San Nicolás de Galeana y además las de San Vicente Galeana y San Antonio Chiverías por concentraciones de partículas  $PM_{10}$  que pueden ir de 2 926 a 29 262  $\mu g m^{-3}$  y por partículas  $PM_{2.5}$  que pueden ir de 2 067 a 20 679  $\mu g m^{-3}$ , afectando cerca de 2 089 habitantes.



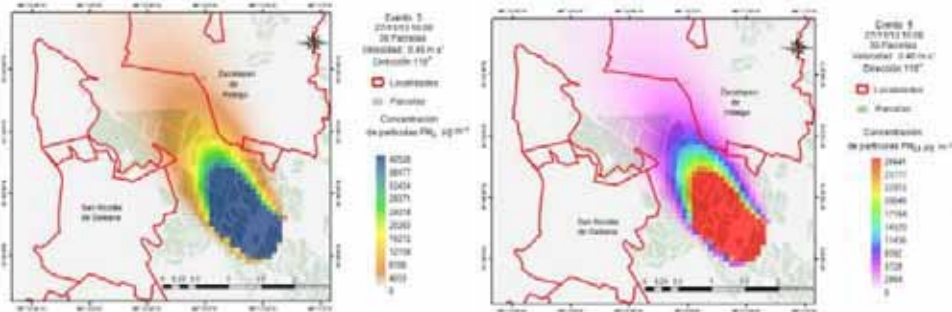
**Figura 89: Modelado de la concentración de partículas PM<sub>10</sub> (izquierda) y PM<sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 22/11/13 a las 13:00 h.**

En la Figura 90 se puede observar la afectación en la comunidades de San Nicolás de Galeana, San Antonio Chiverías, San Vicente Galeana, Colonia Guadalupe Victoria por concentraciones de PM<sub>10</sub> que pueden ir de 6 892 a 68 925 µg m<sup>-3</sup> PM<sub>2.5</sub> que pueden ir de 4 870 a 48 707 µg m<sup>-3</sup>, sin embargo la afectación es mayor por altas concentraciones que cubren a las comunidades que en la Figura 89, esto debido a la dirección del viento, la población afectada cerca de 1 359 habitantes.



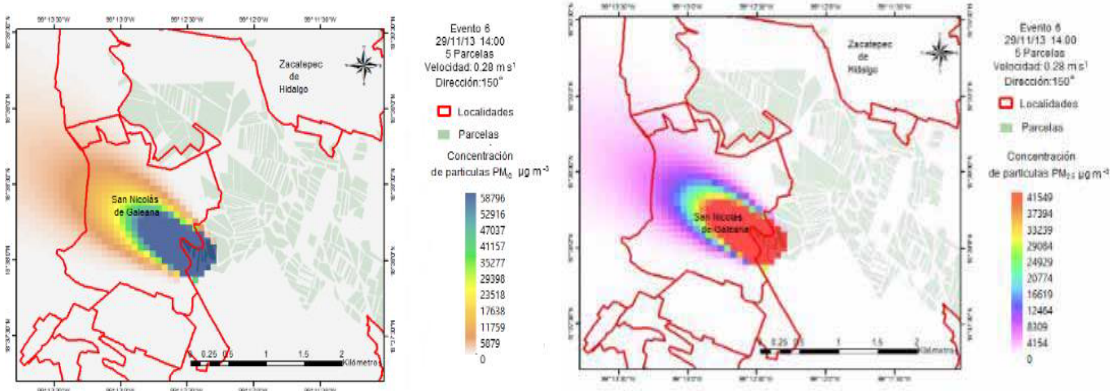
**Figura 90: Modelado de la concentración de partículas PM<sub>10</sub> (izquierda) y PM<sub>2.5</sub> (derecha), de las quemas del día 23/11/13 a las 13:00 h.**

En la Figura 91 se puede observar no hay afectación directa en ninguna localidad habitada.



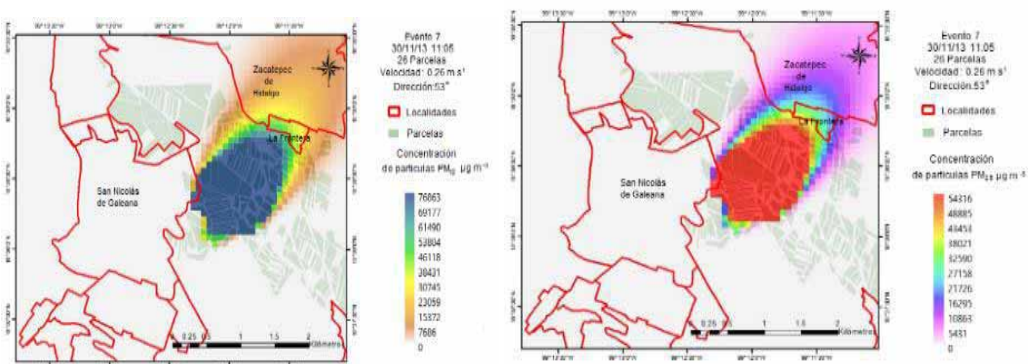
**Figura 91: Modelado de la concentración de partículas PM<sub>10</sub> (izquierda) y PM<sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 27/11/13 a las 16:00 h.**

En la Figura 92 se puede ver la afectación directa por la ubicación de la pluma en la comunidad de San Nicolás de Galeana, por concentraciones de partículas  $PM_{10}$  que pueden ir de 5 879 a 58 796  $\mu g m^{-3}$  y de partículas  $PM_{2.5}$  que pueden ir de 4 154 a 41 549  $\mu g m^{-3}$ , alrededor de 10 726 habitantes afectados.



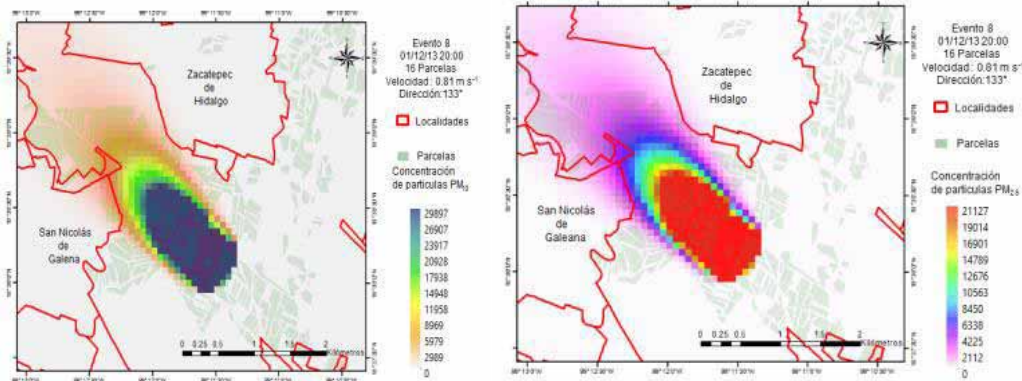
**Figura 92: Modelado de la concentración de partículas  $PM_{10}$  (izquierda) y  $PM_{2.5}$  (derecha) de las quemas del día 29/11/13 a las 4:00h.**

En la Figura 93 se puede observar la afectación en las comunidades de Zacatepec de Hidalgo y la Frontera en Jojutla por concentraciones de partículas  $PM_{10}$  que pueden ir de 7 686 a 53 804  $\mu g m^{-3}$  y de partículas  $PM_{2.5}$  que pueden ir de 5 431 a 54 316  $\mu g m^{-3}$ , afectando cerca 152 habitantes, sin embargo en este caso la zona afectada tiene concentraciones bajas en comparación con la Figura 96.



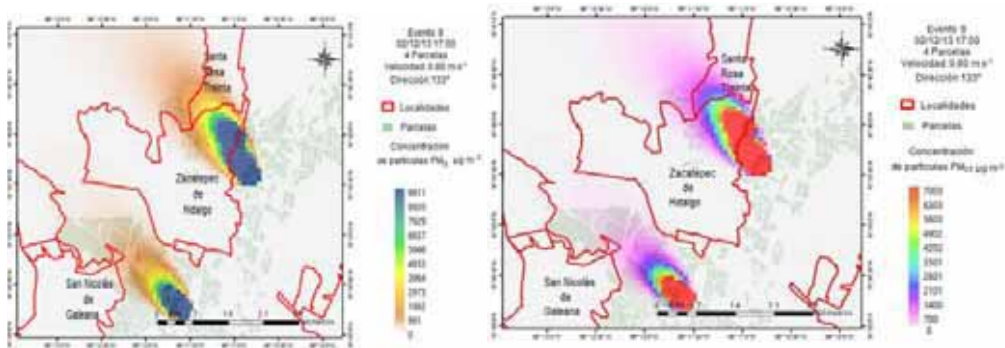
**Figura 93: Modelado de la concentración de partículas  $PM_{10}$  (izquierda) y  $PM_{2.5}$  de las quemas del día 30/11/13 a las 11:00 h.**

En la Figura 94 se puede observar que no se tiene afectación directa a ninguna zona poblada.



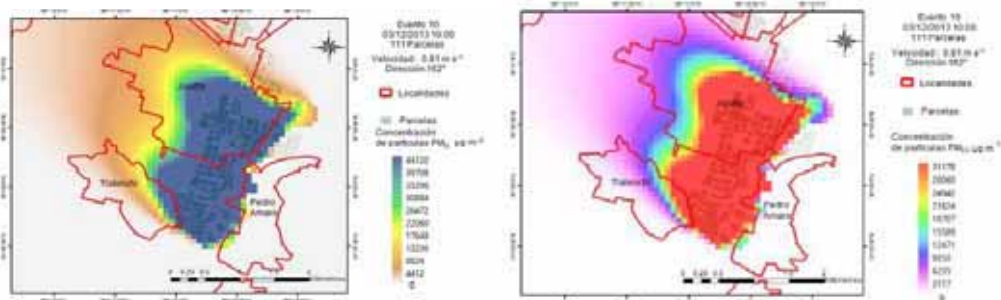
**Figura 94: Modelado de la concentración de partículas PM<sub>10</sub> (izquierda) y PM<sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 01/12/13 a las 20:00 h.**

En la Figura 95 se observan 2 plumas, sin embargo solo una afecta directamente a la comunidad de Zacatepec de Hidalgo por concentraciones de partículas PM<sub>10</sub> que pueden ir de 991 a 9 911µg m<sup>-3</sup> y de partículas PM<sub>2.5</sub> que pueden ir de 700 a 7 003 µg m<sup>-3</sup>, cerca de 177 habitantes.



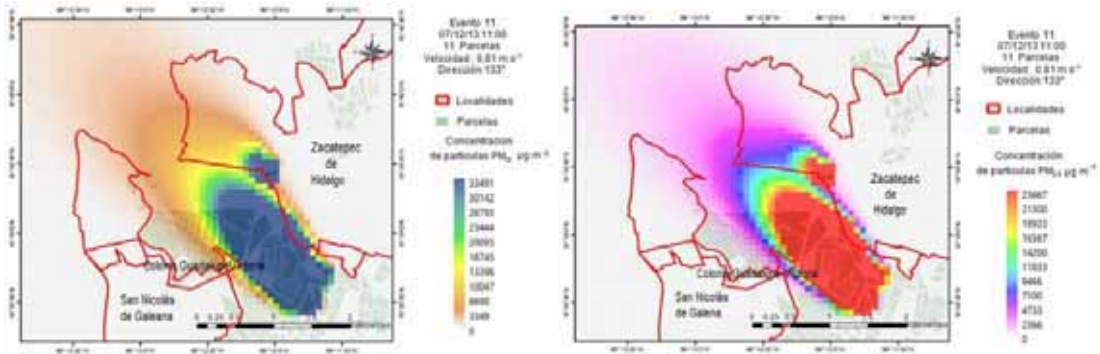
**Figura 95: Modelado de la concentración de partículas PM<sub>10</sub> (izquierda) y PM<sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 02/12/13 a las 17:00 h.**

En la Figura 96 se puede observar la afectación en casi toda la comunidad de Jojutla y en poca proporción en Tlaltenchi y Pedro Amaro por concentraciones de partículas PM<sub>10</sub> que pueden ir de 4 412 a 44 120 µg m<sup>-3</sup> y de partículas PM<sub>2.5</sub> que pueden ir de 3 117 a 31 178 µg m<sup>-3</sup>, afectando cerca de 51,604 habitantes, esto se debe a la cantidad de parcelas quemadas 111 y la dirección del viento propicio que se afecte esta zona.



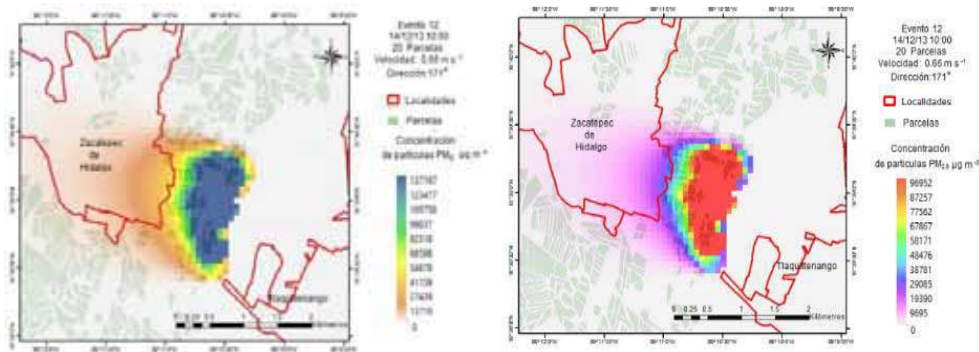
**Figura 96: Modelado de la concentración de partículas de PM<sub>10</sub> (izquierda) y PM<sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 03/12/13 a las 10:00 h.**

En la Figura 97 se puede observar la afectación en la comunidad de Galeana y Zacatepec por concentraciones de partículas  $PM_{10}$  que pueden ir de 3 349 a 33 491  $\mu g m^{-3}$  y partículas  $PM_{2.5}$  que pueden ir de 2 366 a 23 667  $\mu g m^{-3}$ , afectando cerca 17 habitantes con la mayor concentración de partículas.



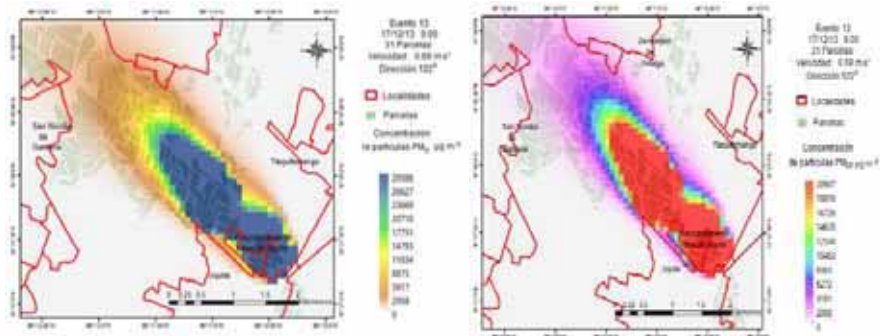
**Figura 97: Modelado de la concentración de partículas  $PM_{10}$  (izquierda)  $PM_{2.5}$  (derecha) de las quemas del día 07/12/13 a las 11:00 h.**

En la Figura 98 se puede ver la afectación en la comunidad de Zacatepec de Hidalgo por concentraciones de partículas  $PM_{10}$  que pueden ir de 13 719 a 137 197  $\mu g m^{-3}$  y de partículas  $PM_{2.5}$  que pueden ir de 9 695 a 96 952  $\mu g m^{-3}$ , afectando una zona habitada pero puede estar impactando un centro deportivo, lo cual podría afectar a un número de personas.



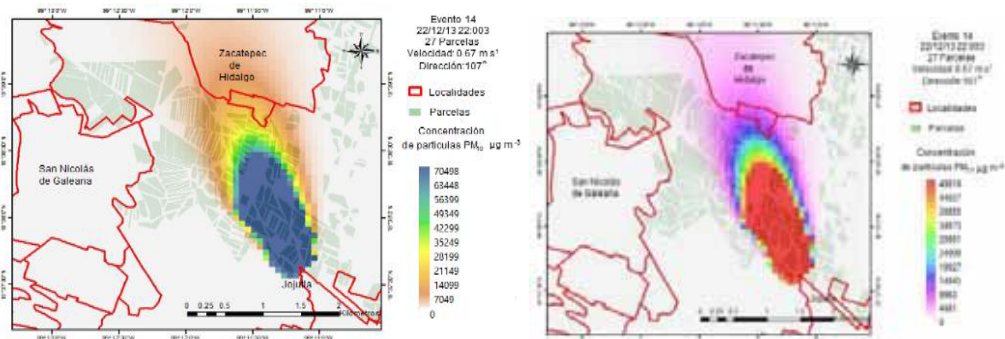
**Figura 98: Modelado de la concentración de partículas  $PM_{10}$  (izquierda) y  $PM_{2.5}$  (derecha) de las quemas del día 4/12/13 a las 10:00 h.**

En la Figura 99 se puede observar que no hay afectación a ninguna zona poblada.



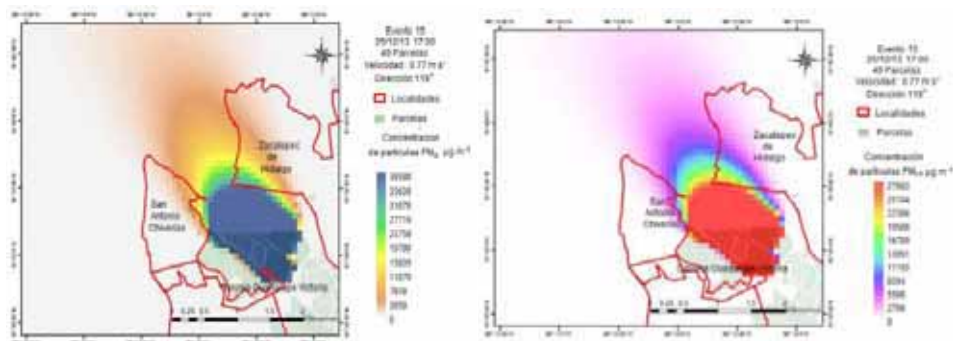
**Figura 99: Modelado de la concentración de partículas PM<sub>10</sub> (izquierda) y PM<sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 17/12/13 a las 9:00h.**

En la Figura 100 se puede observar la afectación en la comunidad de Zacatepec de Hidalgo y la Frontera por concentraciones de partículas PM<sub>10</sub> que pueden ir de 7 049 a 21 149  $\mu\text{g m}^{-3}$  PM<sub>2.5</sub> que pueden ir de 4 981 a 14 945 de  $\mu\text{g m}^{-3}$ , que son concentraciones bajas afectando cerca de 267 habitantes.



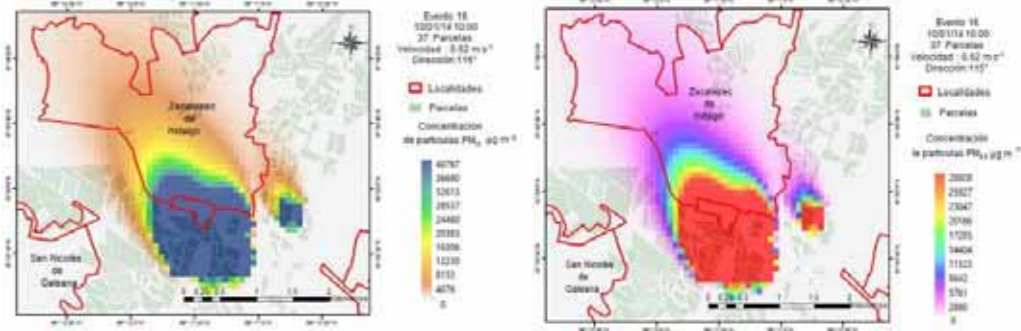
**Figura 100: Modelado de la concentración de partículas PM<sub>10</sub> (izquierda) y PM<sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 22/12/13 a las 22:00 h.**

En la Figura 101 se puede ver la afectación en las comunidades de San Antonio Chiverías y Zacatepec de Hidalgo por concentraciones de partículas PM<sub>10</sub> que pueden ir de 3 959 a 39 598  $\mu\text{g m}^{-3}$  y de partículas PM<sub>2.5</sub> que pueden ir de 2 798 a 27 983  $\mu\text{g m}^{-3}$ , considerándose concentraciones bajas y que afectan alrededor de 33 habitantes.



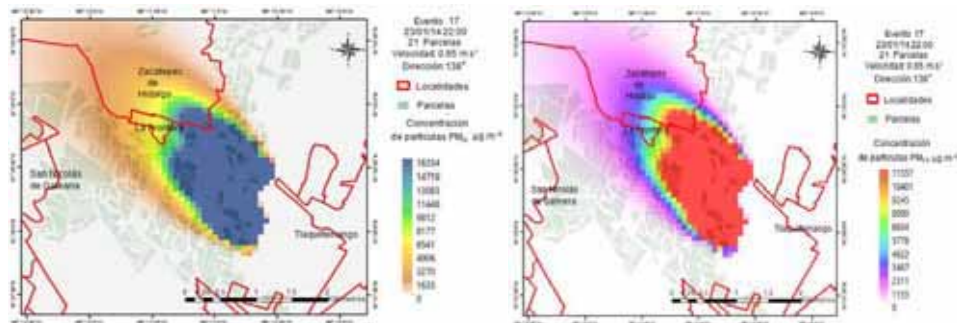
**Figura 101: Modelado de la concentración de partículas PM<sub>10</sub> (izquierda) y PM<sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 25/12/13 a las 17:00h.**

En la Figura 102 se puede observar la afectación en la comunidad de Zacatepec de Hidalgo por concentraciones de  $PM_{10}$  que pueden ir de 4 076 a 40 767 de  $\mu g m^{-3}$  y por concentraciones de  $PM_{2.5}$  que pueden ir de 2 880 a 28 808 de  $\mu g m^{-3}$ , considerándose desde bajas hasta altas concentraciones dependiendo la ubicación afectando cerca de 267 habitantes.



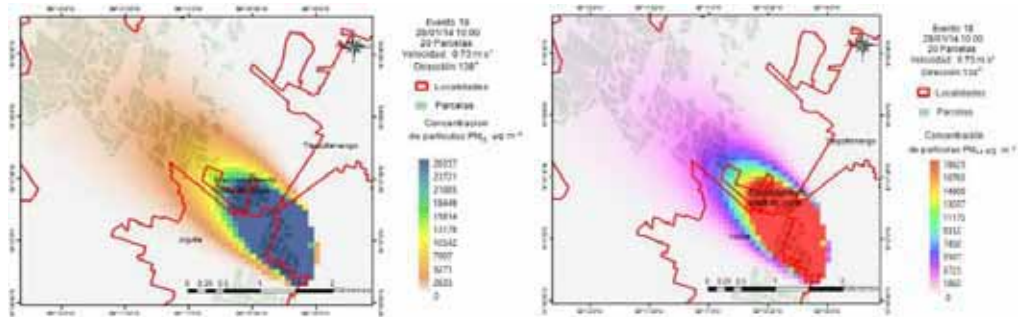
**Figura 102: Modelado de la concentración de partículas  $PM_{10}$  (izquierda) y  $PM_{2.5}$  (derecha) de las quemas del día 10/01/4 a las 10:00h.**

En la Figura 103 puede observar la afectación en las comunidades de Zacatepec de Hidalgo y la Frontera por concentraciones de  $PM_{10}$  que pueden ir de 16345 a 16 354  $\mu g m^{-3}$  y por concentraciones de  $PM_{2.5}$  que pueden ir de 1 115 a 11 557 de  $\mu g m^{-3}$ , considerando estas concentraciones como bajas afectando 277 habitantes.



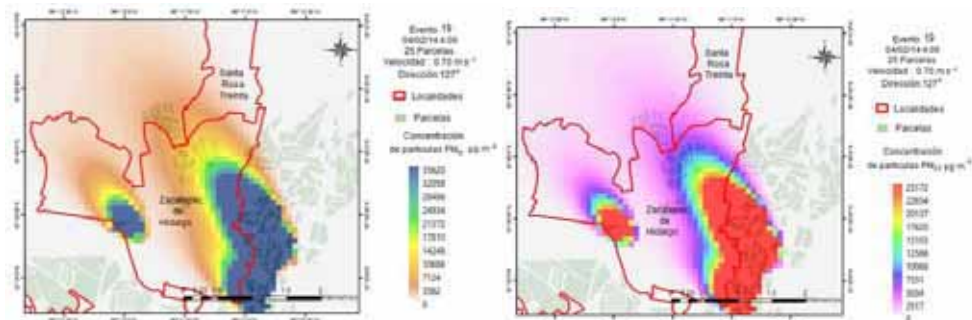
**Figura 103: Modelado de la concentración de partículas  $PM_{10}$  (izquierda) y  $PM_{2.5}$  (derecha) de las quemas del día 23/01/14 a las 22:00 h.**

En la Figura 104 se puede observar la afectación en las comunidades de Zacatepec de Hidalgo y la Frontera por concentraciones de  $PM_{10}$  que pueden ir de 2 635 a 26 357  $\mu g m^{-3}$  y por concentraciones de  $PM_{2.5}$  que pueden ir de 1 862 a 18 625 de  $\mu g m^{-3}$ , afectando cerca de 77 habitantes.



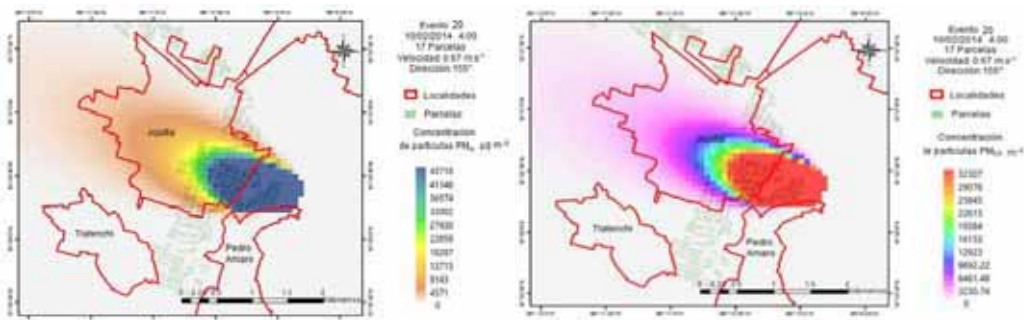
**Figura 104: Modelado de la concentración de partículas PM<sub>10</sub> (izquierda) PM<sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 28/01/14 a las 10:00 h.**

En la Figura 105 se puede ver la afectación en la comunidad de Zacatepec de Hidalgo por dos plumas de dispersión por concentraciones de PM<sub>10</sub> que pueden ir de 3 562 a 26 357  $\mu\text{g m}^{-3}$  y por concentraciones de PM<sub>2.5</sub> que pueden ir de 2 517 a 25 172 de  $\mu\text{g m}^{-3}$ , afectando cerca de 500 habitantes.



**Figura 105: Modelado de la concentración de partículas PM<sub>10</sub> (izquierda) y PM<sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 04/02/14 a las 4:00 h.**

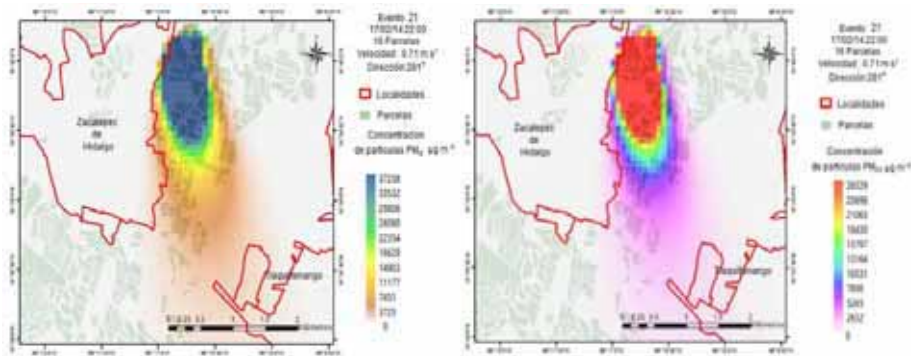
En la Figura 106 se puede observar la afectación en las comunidades de Jojutla y Pedro Amaro por concentraciones de PM<sub>10</sub> que pueden ir de 4 571 a 45 718  $\mu\text{g m}^{-3}$  y por concentraciones de PM<sub>2.5</sub> que pueden ir de 3 230 a 32 307 de  $\mu\text{g m}^{-3}$ , afectando cerca de 450 habitantes, que en comparación con la Figura 97 el impacto es menor.



**Figura 106: Modelado de la concentración de partículas PM<sub>10</sub> (izquierda) y PM<sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 10/02/2014 a las 4:00 h.**

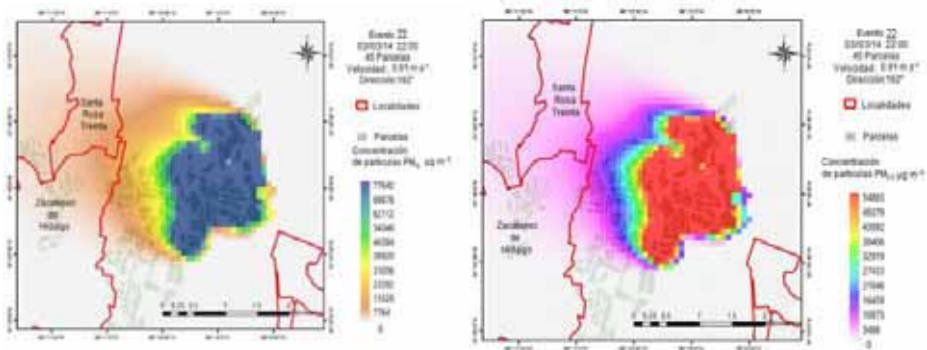
En la Figura 107 se puede observar una mínima zona de afectación en la comunidad de Zacatepec de Hidalgo por concentraciones de PM<sub>10</sub> que pueden ir de 3 725 a 37 258  $\mu\text{g m}^{-3}$  y por concentraciones de PM<sub>2.5</sub> que pueden ir de 2 632 a 26 329 de  $\mu\text{g m}^{-3}$ , sin afectación directa a zonas habitadas.





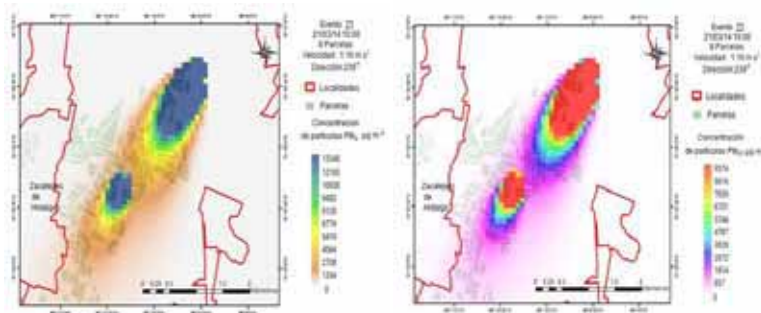
**Figura 107: Modelado de la concentración de partículas PM<sub>10</sub> (izquierda) y de PM<sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 17/02/14 a las 22:00 h.**

En la Figura 108 se puede observar la afectación en las comunidades de Zacatepec de Hidalgo y Santa Rosa Treinta por concentraciones de PM<sub>10</sub> que pueden ir de 7 764 a 15 528 µg m<sup>-3</sup> y por concentraciones de PM<sub>2.5</sub> que pueden ir 5 486 a 10 973 de µg m<sup>-3</sup>, sin afectación directa a zonas habitadas.



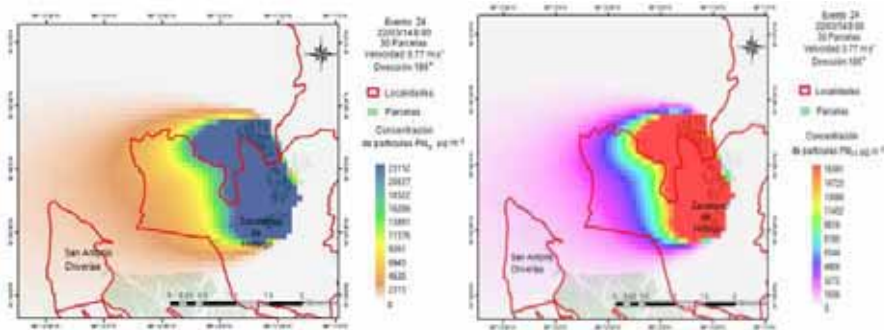
**Figura 108: Modelado de la concentración de partículas PM<sub>10</sub> (izquierda) y PM<sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 03/03/14 a las 22:00 h.**

En la Figura 109 se puede observar sin afectación en la comunidad poblada.



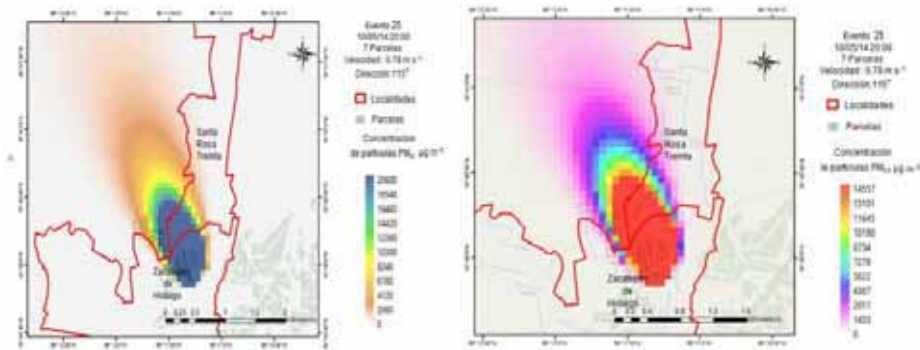
**Figura 109: Modelado de la concentración de partículas PM<sub>10</sub> (izquierda) y PM<sub>2.5</sub> (derecha) de las quemas del día 21/03/14 a las 10:00 h.**

En la Figura 110 se puede observar la afectación en la comunidad de Zacatepec de Hidalgo por concentraciones de  $PM_{10}$  que pueden ir de 2 315 a 23 152  $\mu g m^{-3}$  y por concentraciones de  $PM_{2.5}$  que pueden ir 1 636 a 16 361 de  $\mu g m^{-3}$ , afectando una comunidad muy poblada de 21 586 habitantes.



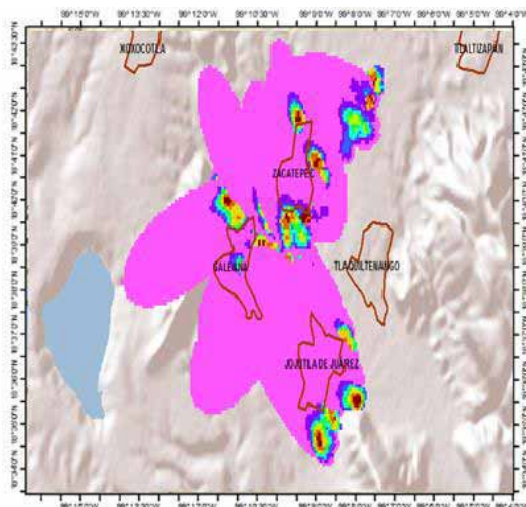
**Figura 110: Modelado de la concentración de partículas  $PM_{10}$  (izquierda) y  $PM_{2.5}$  (derecha) de las quemas del día 22/03/14 a las 8:00 h.**

En la Figura 111 se puede ver la afectación en la comunidad de Zacatepec de Hidalgo por concentraciones de  $PM_{10}$  que pueden ir de 3 562 a 26 357  $\mu g m^{-3}$  y por concentraciones de  $PM_{2.5}$  que pueden ir 2 517 a 25 172 de  $\mu g m^{-3}$ , afectando una comunidad poco poblada de 257 habitantes.



**Figura 111: Modelado de la concentración de partículas  $PM_{10}$  (izquierda) y  $PM_{2.5}$  (derecha) de las quemas del día 10/05/14 a las 20 h.**

En la Figura 112 se observa el conjunto de plumas de todas las quemas con lo cual se ve un gran afectación en Zacatepec, Jojutla y Galeana.



**Figura 112: Modelado de la concentración de partículas de todas las quemas y las zonas de mayor impacto.**

### **Discusión de resultados del modelado gaussiano de la dispersión de emisiones de las quemas.**

Del modelado de la dispersión se observó que las comunidades aledañas a las quemas están siendo impactadas con concentraciones muy altas de partículas, que de acuerdo al modelado podrían alcanzar hasta 53 804  $PM_{10}$  y 38 021  $PM_{2.5}$ . Estas concentraciones tan extremas se explican por el traslape de las plumas de contaminantes ya que se queman varias parcelas al mismo tiempo y las emisiones se acumulan en la nube de partículas. Si bien, la duración de los eventos de quema puede ir de solo 26 minutos a 1 hora, las partículas pueden quedar suspendidas por largos periodos de tiempo. Lo anterior evidencia el alto riesgo a las salud por la exposición a altas concentraciones de partículas que provocan las quemas en esta región, afectando de 77 a 51 604 habitantes.

La tabla 13 muestra las localidades impactadas por cada evento de quema y en donde se puede observar que la mayoría tuvo impacto sobre al menos un polígono poblacional. Esto demuestra que los eventos de quema no se realizan considerando la posibilidad de evitar el impacto al tomar en cuenta las condiciones meteorológicas.

**Tabla 14: Eventos de quemas y número de localidades afectadas**

No. Evento	Cantidad de Parcelas	Área (ha)	Duración(Min)	Número de zonas de Impacto
1	15	19.4	39	1 localidad
2	32	56.5	53	3 localidades
3	3	4.1	41	4 localidades
4	35	44.7	38	4 localidades
5	30	38.2	38	Sin afectación a localidad
6	5	4.5	27	1 localidad
7	26	31.6	36	2 localidad
8	16	24.8	47	Sin afectación a localidad
9	4	6	45	1 localidades
10	111	114.3	31	3 localidades
11	40	56.2	42	1 localidad
12	20	32.4	49	1 localidades
13	31	73.4	71	1 localidades
14	27	28.9	32	Sin afectación a localidad
15	49	98.7	60	3 localidades
16	37	54.8	44	2 localidades
17	21	26.1	37	2 localidad
18	20	31.6	47	3 localidades
19	25	36.7	44	1 localidad
20	17	15.2	27	2 localidades
21	16	22.5	42	1localidad
22	45	96	64	Sin afectación a localidad
23	8	13.6	51	Sin afectación a localidad
24	30	41	41	1 localidades
25	7	10.5	45	2 localidad

En la siguiente tabla 14 se muestran las tres localidades más pobladas indicando el número de eventos que afecto a cada localidad así como la población que podría estar siendo afectada. Aquí se resalta el hecho de que, durante la temporada de zafra, la población de estas comunidades es afectada repetidamente por la contaminación generada por las quemas, deteriorando su calidad de vida durante estos meses y, seguramente, incidiendo de forma negativa en su salud.

**Tabla 15: Principales localidades y población afectada**

<b>Localidad</b>	<b>Población</b>	<b>Eventos</b>
<b>Zacatepec de Hidalgo</b>	21 586	10
<b>San Nicolás de Galeana</b>	10 726	5
<b>Jojutla</b>	51 604	14

En la tabla se puede observar que en cada evento de quema se está afectando una población de 10 726 y puede llegar a afectar a 83,916 habitantes lo cual demuestra que hay un gran impacto a la población y al ambiente por las quemas.

## 7. Conclusiones:

Por primera vez en el estado de Morelos se realizó un estudio referente a la calidad de aire durante un periodo que comprende la actividad agroindustrial, la actividad industrial y el periodo sin actividad, con lo cual se puede apreciar que la principal fuente de emisión de partículas se debe a la quema de caña como parte del proceso agrícola y a las emisiones del ingenio.

Se concluyó que en el periodo de actividad agroindustrial aumenta significativamente la concentración de  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ , en comparación con la industrial y cuando no hay actividad, lo anterior ocasiona que se rebasen los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-025-SSA1-2014.

Durante todos los días de las campañas de monitoreo se observó que durante la zafra las concentraciones de  $PM_{10}$  y de  $PM_{2.5}$  son hasta tres veces más altas que en el periodo sin zafra y excedieron el límite permisible establecido por la NOM-025-SSA1-2014. Lo anterior es un indicativo de que se requiere llevar a cabo acciones de prevención enfocadas a proteger la salud de la población.

La zona más afectada por las emisiones del Ingenio se encuentra en un perímetro menor a un kilómetro afectando directamente la zona de Zacatepec Centro. El perímetro de impacto está siendo fuertemente determinado por la meteorología que predomina en la región, con baja velocidad de vientos y frecuentes periodos de calmas. Las tasas de emisión, las quemas y la meteorología se suman al hecho de que las chimeneas del Ingenio son muy bajas lo cual no favorece la rápida dispersión y dilución de los contaminantes.

El modelado de las plumas de dispersión de partículas producidas por las quemas muestra que los episodios de quemas pueden durar menos de dos horas, pero generan nubes de concentraciones de  $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$  extremadamente altas, afectando significativamente a las poblaciones aledañas de los cañaverales como es: Jojutla con un mayor impacto de las emisiones seguido de Zacatepec y Galeana.

Estos resultados explican las observaciones de los muestreos lejanos al ingenio en donde se encontraron concentraciones por encima de la norma ahora se dice que son debidas a las quemas durante los meses que se llevó a cabo la medición. Este puede ser el caso de Jojutla en donde se midieron altas concentraciones de partículas  $209 \mu\text{g m}^{-3}$  de  $PM_{10}$  Y  $PM_{2.5}$   $143 \mu\text{g m}^{-3}$  durante los meses de febrero a marzo 2014.

Los resultados del modelado refuerzan la necesidad de suprimir la práctica de la cosecha por quema, ya que los impactos repercuten severamente en la calidad del aire en la zona y por lo tanto en la salud de sus habitantes.

Este trabajo contribuye al estado del arte sobre las afectaciones de las quemas en la región cañera de Zacatepec, así como la medición de partículas durante la actividad agroindustrial, la actividad Industrial y en ausencia como referencia.

## Referencias:

AIDA. (2009). El Carbono Negro:Concepto, Efectos Climáticos y Oportunidades en su Control, Asociación Interamericana para la Defensa del Ambiente.

Aizpuru, I., Aseginolaza C, P. Catalán & Uribe-Echebarría. P.M. (1993). Catálogo florístico de Navarra. Informe técnico. Dpto. de Medio Ambiente, Gobierno de Navarra. Pamplona.  
American Thoracic Society. (1996). International Conference. New Orleans, Louisiana, May 10-15. *Am J Respir Crit Care Med.* 1996 Apr; 153(4 Pt 2):A1-940.

Alfaro-Moreno E, Martinez L, Garcia-Cuellar C, Bonner JC, Murray JC, Rosas I. (2002). Biologic effects induced in vitro by PM<sub>10</sub> from three different zones of Mexico City. *Environ Health Perspect*; 110:715–720.

American Thoracic Society. (1996). Hospital-acquired pneumonia in adults: diagnosis, assessment of severity, initial antimicrobial therapy, and preventive strategies [consensus statement]. *Am J Respir Crit Care Med*;153:1711–1725.

Bachmann, J. (2009). Black Carbon: A Science/Policy Primer, Pew Center on Global Climate Change.

Backer S, Dailey LA, Soukup JM, Grambow SC, Devlin RB, Huang YC.(2005). Seasonal variations in air pollution particle-induced inflammatory mediator release and oxidative stress. *Environ Health Perspect*;113:1032–1038

Baron, R. E.; Montgomery, W. D.; Tuladhar, S. D. (2009). An analysis of black carbon mitigation as a response to climate change. Copenhagen Consensus Center, Denmark.

Bohórquez, A, Lugo, D. (2010). Cuantificación y análisis de gases de efecto invernadero (GEI) en el ciclo de vida del etanol obtenido de la caña de azúcar, con base en las directrices del IPCC 2006. Caso de estudio: Ingenio Providencia S.A. Universidad de la Salle Facultad de Ingeniería Programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria Bogotá.

Bond, T. C. and H. Sun. (2005). "Can reducing black carbon emissions counteract global warming" *Environmental Science and Technology* 39: 5921-5926.

Boopathy R. (2002) .Sugar cane (*Saccharum officinarum*) burning and asthma in southeast Louisiana, USA", *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, núm. 68, pp. 173-179.

Brunekreef, B., Holgate, S. (2002). Air pollution and health. *Lancet* 360, 1233– 1242.

Buitrago J.(2003).Aplicación del Modelo Gaussiano para determinar la calidad del aire de Manizales Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.

BUN-CA.(2002). Biomass Users Network Centro America. Manuales sobre energía renovables Biomasa.

Buschini, A., Cassoni, F., Anceschi, E., Pasini, L., Poli, P., Rossi, C., (2001) .Urban airborne particulate: genotoxicity evaluation of different size fractions by mutagenesis tests on microorganisms and comet assay *Chemosphere* 44, 1723– 1736.

Bustos S.C (2004). Aplicación de modelos de dispersión atmosférica en la evaluación de impacto ambiental: Análisis de proceso. 86 pp. Tesis de Maestría Universidad de Chile, Chile.

Carretero, J.I.(2004). Flora arvensis española. Las malas hierbas de los cultivos españoles. Phytoma. Valencia.

Caballero, M., Lozano, S y Ortega, B. (2007). "Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra". Revista Digital Universitaria [en línea]. 10 de octubre de 2007, Vol. 8, No. 10. Recuperado de <<http://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/int78.htm>>ISSN: 1607-6079.

Cabrera, J.A., y Zuaznábar, R. (2010). Impacto sobre el ambiente del monocultivo de la caña de azúcar con el uso de la quema para la cosecha y la fertilización nitrogenada. Cultivos tropicales, 31(1) pp. 5-13.

CEAMA (2007). Inventario de Emisiones a la Atmósfera del Estado de Morelos 2004. Comisión Estatal del Agua y Medio Ambiente. Informe. Morelos, México. 115 pp.

CEFP. (2001). Centro de Estudios de las Finanzas Publicas La agroindustria azucarera en México Cámara de Diputados 2001 Palacio Legislativo de San Lázaro, D.F. Septiembre 2001.

CEPIS. (2005). Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. 1982. Red Panamericana de Muestreo de la Contaminación del Aire – REDPANAIRES. Informe final 1967-1980. Lima.

Chaves M. (2003) Comportamiento de la ceniza (tizne) generadas en quemadas de caña según datos de vientos suministrados por la red meteorológica automatizada: XV Congreso de Asociación de Técnicos Azucareros de Costa Rica ATACORI, Guanacaste, 2003.

Cheesman, O. (2004) Environmental impacts of sugar production: the cultivation and processing of sugarcane and sugar beet. CABI.

Chen J.C.P. and Chou, C. 1993.Cane Sugar Handbook, Twelfth Edition, John Wiley and Sons, Inc., NY.

Chen, J., Ying, Q., y Kleeman, M. (2009). Source apportionment of visual impairment during the California regional PM10/PM2.5 air quality study. Atmospheric Environment, 43, 6136-6144.

Chong, NS., Sivaramakrishnan, K., Wells, M., Jones, K. (2002). Characterization of Inhalable Particulate Matter in Ambient Air by Scanning Electron Microscopy and EnergyDispersive X-ray Analysis. EJEAFC. 1 (3): 1579-4377.

C2ES. (2010) Center for Climate and Energy Solutions.

CNEAA. (1997) Guía Metodológica para la Evaluación del Impacto Ambiental Atmosférico. Dawidoski, L., Gómez, D., Reich, S., Buenos Aires, Septiembre, 1997.



CNIAA. (2010). Cámara Nacional de las Industrias Azucarera y Alcohólica, México [en línea] [fecha de consulta: 13 de septiembre de 2015]. Disponible en: <http://www.camaraazucarera.org.mx/>.

CONADESUCA. (2012). Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar Superficie industrializada (hectárea) ciclos 2006/7 a 2012/13.

Crespo, H. (1988). Historia del azúcar en México, México, FCE y Azúcar S.A., 1989-1990, t. I, pp. 262-304.

Crutzen, P. J., and M. O. Andreae. (1990). Biomass burning in the tropics: Impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles, *Science*, 250, 1669-1678.

De Nevers. (2000). *Air Pollution Control Engineering*. New York. Mc Graw- Hill.

Dennis, A.; Fraser, M.; Anderson, S.; Allen, D. (2002). "Air pollutant emissions associated with forest, grassland, and agricultural burning in Texas", *Atmos. Environ.* , 36(no. 23), 3779-3792.

Devesa, J.A. (1997). Plantas con semillas in Izco et al., *Botánica*: 379-580. Editorial Reverté. Barcelona.

Dixon, R. (1996). Sistemas agroforestales y gases de invernadero. En: *Revista sobre Agroforestería*. CATIE, Costa Rica.

Domínguez, C. A. (2012). Programa de prevención, minimización y control de la contaminación ambiental para la Industria Azucarera. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.

DOF. (2014). Diario Oficial de la Federación. Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2014-2018.

DOF. (2015). Diario Oficial de la Federación Convocatoria de la licitación pública Ipem<sup>n</sup> 01/15 para la venta de portafolios conformados por unidades industriales que operan como ingenios azucareros.

Domínguez, C.A., Bravo, H, Sosa, R. (2014). Prevención, minimización y control de la contaminación ambiental en un ingenio azucarero de México. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XV, 04: 549-560.

Englert, N. (2004). Fine particle and human health a review of epidemiological studies. *Toxicol. Lett.* 149, 235–242.

EPA. (2010). Sugar Processing. Food And Agricultural Industry. 9.10.1.1-5.

EPA. (2013). National Ambient Air Quality Standards (NAAQS).

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY.(1999). Ambient air quality, pollutant dispersion and transport models. Informe de la European Environment Agency.

FAOSTAT. (2002). Food and Agriculture Organization of United Nations. Recuperado el 6 de Marzo de 2014, de <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>.

Fideicomiso Ingenio Emiliano Zapata. (2014). Recuperado el 2014, de <http://ingemilianozapata.com.mx/localizacion.html>.

FAO. (2008). Contribution of the forestry sector to national economies, 1990-2006, A. Lebedys. Forest Finance Working Paper FSFM/ACC/08. Roma. [www.fao.org/docrep/011/k4588e/k4588e00.htm](http://www.fao.org/docrep/011/k4588e/k4588e00.htm)

FAOSTAT. (2014). *Food and Agriculture Organization of United Nations*. Recuperado el 6 de Marzo de 2014, de <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>

Ferge, T., Maguhn, T., Hafner, K., Mühlberger, F., Davidovic, M., Warnecke, R. and Zimmermann, R. (2005). On-Line Analysis of Gas-Phase Composition in the Combustion Chamber and Particle Emission Characteristics during Combustion of Wood and Waste in a Small Batch Reactor, *Environmental Science & Technology* ;39 (6), 1393-1402 DOI: 10.1021/es049493o

Fujita, K., Ohta, T., and Ageta, Y. (2007). Characteristics and climatic sensitivities of runoff from a cold-type glacier on the Tibetan Plateau, *Hydrol. Process.*, 21(21), 2882–2891, doi:10.1002/hyp.6505.

Galloway, J.H. (1989). *The Sugar Cane Industry. An historical geography from its origins to 1914*. Cambridge University Press.

García, L. (1998). Colonos, agricultores cañeros, ¿clase media rural en Cuba?, 1880-1898, *Revista de Indias*, 212 :131-162.

GRAIN. (2009). “Emporios del azúcar; la inminente invasión de la caña transgénica”. El texto completo está disponible en [www.grain.org](http://www.grain.org).

GTZ/BMZ. (1995). *Environmental Handbook Volume II: Agriculture, Mining/Energy, Trade/Industry*, 736 pp.

Hall, D., Wu, C.-Y., Hsu, Y.-M., Stormer, J., Engling, G., Capeto, K., Yu, K.-M. (2012). PAHs, carbonyls, VOCs and PM<sub>2.5</sub> emission factors for pre-harvest burning of Florida sugarcane. *Atmospheric Environment*, 55, 164–172.

Hays, M., Geron, C., Kara, L., and Dean, S., and Schauer, J. (2002). Speciation of Gas-Phase and Fine Particle Emissions from Burning of Foliar Fuels *Environmental Science & Technology* 2002 36 (11), 2281-2295.

Hernández, Y. (1995). Efecto de la quema de la caña de azúcar sobre la incidencia de enfermedades respiratorias en dos localidades del estado Aragua, Venezuela.

Hocking, M. (1998). *Handbook of Chemical Technology and Pollution Control*, Academic Press, ISBN: 978-0-12-088796-5.

IGSD [Institute for Governance & Sustainable Development]. (2009). Reducing black carbon may be the fastest strategy for slowing climate change. IGSD/INECE Climate Briefing Note. En: IGSD.

INAFED. (2010). Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal. Enciclopedia de los Municipios y Delegaciones de México. Recuperado el 21 de Octubre de 2015 de <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM17morelos/municipios/17031a.html>.

INIFAP. (2000). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias centro de Investigación regional del centro campo experimental "ZACATEPEC" Paquete Tecnológico para cultivo de caña de azúcar en el Estado de Morelos. Zacatepec, Morelos, México.

INIFAP. (2012). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias centro de Investigación regional del centro campo experimental "ZACATEPEC" Paquete Tecnológico para cultivo de caña de azúcar en el Estado de Morelos. Zacatepec, Morelos, México.

INEGI (2010). Localidades de la República Mexicana, 2010, escala: 1:1. Obtenido de Principales resultados por localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2010. Editado por Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). México, D.F.

INE (2006). Inventario Nacional de Emisiones de México 1999. Instituto Nacional de Ecología-Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 380 pp.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 1990 Preparado por el grupo de trabajo del IPCC sobre estrategias de respuesta.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).(2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Technical Summary. Cambridge: WMO-UNEP. Cambridge University Press.

IPCC-Intergovernmental Panel on Climate Change (2007). Cambio climático golpea fuerte a América Latina y el Caribe. [Documento en línea]. Bruselas, 06- 03-2007. Panel intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). Disponible [http://unep.org/pdf/ipcc/IPCC\\_spanish.pdf](http://unep.org/pdf/ipcc/IPCC_spanish.pdf). Consultado 20-10-2007.

IPCC (2008). Cambio Climático 2007. Informe de Síntesis. International Sugar Organization. (2005). An international survey of sugar crop yields and prices paid for sugar cane and beet. Market evaluation consumption and mecas. 5 (05) pp. 49.

IPCC. (2013).Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University Press.

Jackson WA, Achtemeier GL, Goodrick SL (2007). A Technical Evaluation of Smoke Dispersion from the Brush Creek Prescribed Fire and the Impacts on Asheville, North Carolina.

Jacob, D.(1999). Introduction to Atmospheric Chemistry. Universidad de Princeton.1ª ed. New Jersey,pp146.

Jacobson, M. Z. 2000. A physically-based treatment of elemental carbon optics: Implications for global direct forcing of aerosols. *Geophys. Res. Lett.* 27: 217-220.

Kambis, A.D. y Levine, J.S.(1996). "Biomass Burning and the Production of Carbon Dioxide: a Numerical Study", capítulo 17 en: Biomass Burning and Global Change , Joel S.

Kumar, K.R., Narasimbulu, K., Balakrishnaiah, G., et al. (2011) Characterization of Aerosol Black Carbon over a Tropical Semi-arid Region of Anantapur, India, *Atmospheric Research*, 100, 12–27.

Kiely, G. (1999). Ingeniería Ambiental. Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. Madrid, McGraw-Hill. 1330p.

Lara LBLS, Artaxo P, Martinelli LA, Victoria RL, Camargo PB, Krusche A, (2001). Chemical composition of rainwater and anthropogenic influences in the Piracicaba River Basin, Southeast Brazil. *Atmos Environ*; 35(29):4937-45.

Lara L.L., Artaxo P., Martinelli L.A., Camargo P.B., Victoria R.L., Ferraz E.S.B., 2005. Properties of aerosols from sugar-cane burning emissions in Southeastern Brazil. *Atmospheric Environment* 39 4627-4637.

Lavdas, Leonidas G. 1996. Program VSMOKE--Users Manual. Gen. Tech. Rep. SRS-6. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. 156 p.

Lavdas, Leonidas G. 1996. Program VSMOKE - Users Manual. Gen. Tech. Rep. SRS-6 Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station. 147 p.

Lemieux, P.M., Lutes C.C y Santoianni. D.A. 2004. "Emissions of organic air toxics from open burning: a comprehensive review", *Progress in Energy and Combustion Science*, núm. 30, pp. 1-32.

Lengoasa, J. 2007. ONU: Cambio climático ya está actuando y el mundo debe adaptarse y mitigarlo. [Documento en línea]. 03-09-2007. Subsecretario General de la Organización Meteorológica Mundial. Segunda Conferencia Internacional sobre Cambio Climático y Turismo, Davos. Disponible <http://www.pnuma.org/información/noticias/2007-10/03/#03-mundo>. Consultado 07-10-07.

Levine (comp.), Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, EU, vol. 1, pp. 170-177. Saranraj P. and Stella. 2014 Impact of Sugar Mill Effluent to Environment and Bioremediation *World Applied Sciences Journal* 30 (3): 299-316.

Liu Y-Q (2005) Atmospheric response and feedback to radiative forcing from biomass burning in tropical South America. *Agricultural and Forest Meteorology* 133, 40–53. doi:10.1016/J.AGRFORMET.2005.03.011

Lopez-Martinez, J.L y S. Gutierrez-Luju.(1999). Comparación de los datos de dispersión de bióxido de azufre y otros contaminantes en la atmosfera, obtenidos experimentalmente y por simulación usando el modelo ISC3. *Tecnología y Ciencia (IMIQ)*,14(1-2):10-18.

Longoria, R., López., G y Morales, J.A .2014. *Ciencia Global .HYPATIA*.

Martin, D.O (1976).Comment on The Change of Concentration Standard Deviations with Distance.*Journal of the Air Pollution Control Association*, 26.p.145.

Magrin G., Gay D., Cruz J., Giménez A., Moreno G., et al. (2007). Latin America. Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (eds.) M. Parry, O. Canzini, J. Palutikof and C. Hanson. Cambridge University press, Cambridge, UK, 581-615.

Malilay J. (1999) .A review of factors affecting the human health impacts of air pollutants from forest fires. In: Background papers of Health Guidelines for Vegetation Fire Events; 1998 Oct 6-9; Lima, Peru. Geneva: WHO.

Mago, N. (1986). El suelo y su manejo en caña de azúcar. FONAIAP Divulga No. 20. Venezuela.

Martín D, Iglesia A, Pazos. V & Peralta. E (2001) Obtención y evaluación de un anticuerpo policlonal específico de *Leifsonia xyli* subsp. *xyli*. *Protección Vegetal*. 16: 10-14.

Maturana, S. y Restrepo, I. 1970. El azúcar: problema de México. Centro de Investigaciones Agrarias. México.

Mazari R. (rúbrica) 24 de Septiembre de 2009.

Meagher, J.F., Cowling, E.B., Fehsenfeld, F.C. and Parkhurst, W.J. (1998). Ozone formation and transport in southeastern United States: Overview of the SOS Nashville/Middle Tennessee Ozone Study. *Journal of Geophysical Research* 103: doi: 10.1029/98JD01693. issn: 0148-0227.

Ministry for the Environment. (2000). Good Practice Guide for Air Quality Monitoring and Data Management.

Mobley, Hugh E.; [senior compiler] (1976). Southern Forestry Smoke Management Guidebook. Gen. Tech. Rep. SE-10. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station. 140 p.

Molina, E. (1998). Estudio de Caso Sobre el Manejo Convencional y Agroecológico del Cultivo De la Caña de Azúcar en el Valle del Cauca, Colombia.

Molina, L. T., Molina, M. J., Slott, R., Kolb, C. E., Gbor, P. K., Meng, F., Singh, R., Galvez, O., Sloan, J. J., Anderson, W., Tang, X. Y., Shao, M., Zhu, T., Zhang, Y. H., Hu, M., Gurjar, B. R., Artaxo, P., Oyola, P., Gramsch, E., Hidalgo, P., and Gertler, A.(2004). Critical Review Supplement: Air Quality in Selected Megacities, <http://www.awma.org>.

Morales, J. (2011). Impacto ambiental de la actividad azucarera y estrategias de mitigación. Tesis Universidad Veracruzana.

Moreira dos Santos, C., de Almeida Azevedo, D., & de Aquino Neto, F. (2002). Selected organic compounds from biomass burning found in the atmospheric particulate matter over sugarcane plantation areas. *Atmospheric Environment*, 36, 3009–3019.

Mugica-Alvarez Violeta, Santiago-de la Rosa Naxieli, Figueroa-Lara Jesús, Flores Rodríguez Julio, Magaña-Reyes Miguel. 2015. Emissions of PAHs derived from burning and processing of sugarcane in Chiapas and Morelos México. *The Science of the Total Environment*. 474-482. DOI: 10.1016/j.scitotenv. 2015.04.089

Nicholls R., Wong V., Burkett J., Codgnotto J., Hay R., et al. (2007). Coastal systems and low-lying areas. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* (eds.) M. Parry, O. Canzini, J. Palutikof.

NOM-025-SSA1-1993, Norma Oficial Mexicana. Criterios para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al material particulado.

Olivo, M. L. (2009). El potencial incremento del nivel del mar como un resultado del cambio climático global en Venezuela: caso Cabo Codera-Laguna de Tacarigua, estado Miranda. Tesis Doctoral. Mención Excelente. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Humanidades y Educación. 300pp

OMS.(2011). Organización Mundial de la Salud. Calidad del aire exterior y salud. Nota descriptiva N°313.

Palacios-Vélez, Oscar L.; Mejía-Sáenz, Enrique; Piñón-Sosa, Luis; Sánchez-Hernández, Hugo. (2011). La frescura de la caña de azúcar: un caso de estudio en tres ingenios de México. *Agrociencia*, Octubre-Noviembre, 831-847.

Passali, d., Lauriello, m., & Mezzedimi, C. (1999). Nasal allergy and atmospheric pollution. *International*, 49:257-60.

Pasquill F (1974). 'Atmospheric Diffusion: The Dispersion of Windborne Material from Industrial and Other Sources', 2nd edn. (Wiley: New York).

Pilinis, C., Seinfeld, JH.(1987). Continued development of a general equilibrium model for inorganic multicomponent atmospheric aerosols. *Atmos. Environ.* 21: 2453-2466.

Piñeiro M., López P., S. Muniategui, D. Prada, X. Querol, A. Alastuey.( 2003). A new method for the simultaneous determination of PAH and metals in samples of atmospheric particulate matter. *Atmospheric Environment*. Vol. 37. pp. 4171- 4175.

PNUMA.(1999). (Programa de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, CMNUCC. Bonn, Alemania.

Pope (2004). CA III. Air Pollution and Health - Good News and Bad. En: *New England Journal of medicine* Vol. 351. No. 11, 1132-1134.

PRONAC. (2007). Programa Nacional de la Agroindustria de la Caña de Azúcar 2007-2012. Sagarpa. <http://es.scribd.com/doc/2589453/Programa-Nacional-de-la-Agroindustria-de-la-cana-de-azucar-20072012>.

Quintero Núñez, Margarito, & Moncada Aguilar, Andrés. (2008). Contaminación y control de las quemadas agrícolas en Imperial, California, y Mexicali, Baja California. *Región y sociedad*, 20(43), 3-24. Recuperado en 15 de octubre de 2015, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S187039252008000300001&lng=es&tIng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S187039252008000300001&lng=es&tIng=es).

Ripoli, T. (2000). Energy Potencial of Sugar Cane Biomasa in Brazil. *Scientia Agrícola* Vol. 56, n.4, Piracicaba, Brasil.

Romero, E.; Scandaliaris, J.; Digonzelli, P.; Leggio, F.; Giardina, J.; Fernández, J.; Casen, S.; Tonatto, J.; Alonso, L. (2009). La caña de azúcar. Características y ecofisiología. Editorial EEAOC. Tucumán, Argentina.

Ruiz, J. (2002). Simulación de la contaminación atmosférica generada por fuentes móviles en Bogotá. Bogotá D.C. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia.

Sacristán, E. (2006). Las privatizaciones en México. *Economía UNAM*, Vol.3, núm. 9, pp.58.

SAGARPA. (2009). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola de los Estados Unidos Mexicanos por cultivo. México.

Samet, J. M. et al. (2000). The National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study. Part II: Morbidity and mortality from air pollution in the United States II, *Res. Rep. Health Eff. Inst.*, vol. 94, no. Pt 2, pp. 5-70.

Sánchez, M. (1997). Desarrollo de la producción de caña y azúcar en la república mexicana. Montecillo- Texcoco: Colegio de Posgraduados.

Sandoval, F. (1951). La industria de azúcar en Nueva España México D.F Jus. pp. 3

Saranraj P. and Stella. D. (2014). Impact of Sugar Mill Effluent to Environment and Bioremediation *World Applied Sciences Journal* 30 (3): 299-316

Sbarato, D. (2007). Predicción y evaluación de impactos ambientales sobre la atmósfera. Córdoba Argentina. Centro de investigación y formación en salud ambiental. Universidad Nacional de Córdoba. Encuentro Grupo Editor.

Schlesinger, R.B., Kunzli, N., Hidy, G.M., Gotschi, T., Jerrett, M. (2006). "The health relevance of ambient particulate matter characteristics: coherence of toxicological and epidemiological inferences II. *Inhal. Toxicol.* 18, 95–125.

Schwartz J. (2000). The distributed lag between air pollution and daily deaths. *Epidemiology* ;11: 320–326.

SIAP. (2008). Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México. Recuperado en 22 de Octubre, 2015 de <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>

SIAP. (2010). Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Comparativo de Hectáreas Cosechadas para Distintas Zafra (información de cierres) Zafra 2009. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F. Recuperado de <http://www.campomexicano.gob.mx/azcf/reportes/salidaHtml.php>

SIAP. (2011). Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Comparativo de Hectáreas Cosechadas para Distintas Zafra (información de cierres) Zafra 2010. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F. Recuperado de <http://www.campomexicano.gob.mx/azcf/reportes/salidaHtml.php>

Southern Forest Fire Laboratory Personnel. 1976. Southern forestry smoke management guidebook. Gen. Tech. Rep. SE-10. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station. 140 p.

Subirós, P. (2000). Cultivo de la caña de azúcar. Editorial EULAC. San José, Costa Rica. Editorial EEAOC. Tucumán, Argentina. EUNED. Costa Rica.

Sacristán, E. 2006. Las privatizaciones en México. Economía UNAM, Vol. 3, núm. 9. pp58.

Secretaría de Economía (SE, 2012). Análisis de la situación económica, tecnológica y de política comercial del sector edulcorantes en México. Dirección General de Industrias Básicas. pp. 4, 27-69. Recuperado de: [http://www.economia.gob.mx/files/comunidad\\_negocios/industria\\_comercio/Analisis\\_Sectorial\\_Mercado\\_Edulcorantes.pdf](http://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/Analisis_Sectorial_Mercado_Edulcorantes.pdf)

SEMARNAT (2008). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Edición 2008. Compendio de Estadísticas Ambientales. México. 2008.

Secretaría de Desarrollo Sustentable (SEDESU) (2015).

Secretaría de Desarrollo Social, Consejo Nacional de Población e Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, (SEDESOL, CONAPO, INEGI), en: *Delimitación de las Zonas Metropolitanas*, México, 2004.

SIAP. (2008). Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México. Recuperado en 22 de Octubre, 2015 de <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado>.

SIAP. (2010). Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera. Comparativo de Hectáreas Cosechadas para Distintas Zafra (información de cierres) Zafra 2009. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. México, D.F. Recuperado en marzo 15, 2010 de <http://www.campomexicano.gob.mx/azcf/reportes/salidaHtml.php>

Subirós, P. (2000). Cultivo de la caña de azúcar. Editorial EULAC. San José, Costa Rica. Editorial EEAOC. Tucumán, Argentina. EUNED. Costa Rica.



SMAGEM. (2010). a Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México Dirección General de Prevención y Control de la Contaminación Atmosférica Fuentes de Emisión de Carbono Negro en el Estado de México Informe técnico.

Soukup, J., Becker, S. (2001). Human alveolar macrophage responses to air pollution particulates are associated with insoluble components of coarse material, including particulate endotoxin. *Toxicol Appl Pharmacol.* Feb 15; 171(1):20-6.

Tranter, K. (2008). Comité permanente sobre legislación para mujeres profesionales y de negocios internacional (BPW Internacional). [Documento en línea]. 31-03-2008. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Oficina Regional para América Latina y el Caribe. Unidad de Comunicación e Información Pública. Disponible <http://www.pnuma.org/informacion/noticias/2008-03/31/#4>. Consultado 08-05-2007.

Turner DB. (1970). Workbook of atmospheric dispersion estimates. US Environmental Protection Agency, Office of Air Programs, Publication Number AP-26. (Research Triangle Park, NC).

US EPA. (1986). Guideline on Air Quality Model, Revised, EPA-450/2-78- 072R). Research Triangle Park, North Carolina. US EPA, 1987. Sensitivity Analysis for Application of the Inhalation Exposure Methodology (IEM) to Studies of Hazardous Waste Management facilities. EPA/600/2-87/071.

US EPA. (1997). Emission Factor Documentation for AP-42 Section 9.10.1.1. Sugarcane Processing. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards Emission Factors and Inventory Group.

US EPA, (1987). Sensitivity Analysis for Application of the Inhalation Exposure Methodology (IEM) to Studies of Hazardous Waste Management facilities. EPA/600/2-87/071.

US EPA. (1997) .Emission Factor Documentation for AP-42 Section 9.10.1.1. Sugarcane Processing. Environmental Protection Agency Office of Air Quality Planning and Standards Emission Factors and Inventory Group.

US EPA (2003). Revision to the Guideline on Air Quality Models: Adoption of a Preferred Long Range Transport Model and Other Revisions. EPA 40CFR Part 51.

Vardoulakis, S., Fisher, B.E.A., Pericleous, K. and Gonzalez Flesca, N. (2003). Modelling Air Quality in Street Canyons: A Review. *Atmos. Environ.* 37: 155–182.

Viana, A , Nebra, S.A , Lozano M.A, Serra, L.M. (2007). Analysis of process steam demand reduction and electricity generation in sugar and ethanol production from sugarcane Energy conversion and management 48(11):2978-2987.

Viglizzo, E, Pordomingo, A; M. Castro y F. Lértora. (2003). Environmental assessment of agriculture at a regional scale in the Pampas of Argentina. *Environmental Monitoring and Assessment.* 87: 169-195.

Wark, K. & Warner, C.F. (2002). Contaminación del aire, Origen y control. Ed. Limusa.- Noriega Editores. México D.F, 650 pp.

WHO. (2015). Reducing global health risks through mitigation of short-lived climate pollutants coping report for policymakers

WORLD BANK GROUP. (1998). Airshed Models: Pollution Prevention and Abatement Handbook, July 1998.

Yu, O., Sheppard, L., Lumley, T., Koenig, J. Q., & Shapiro, G. G. (2000). Effects of ambient air pollution on symptoms of asthma in Seattle-area children enrolled in the CAMP study. *Environmental Health Perspectives*, 108(12), 1209–1214.

ZAFRANET. (2014). Va más de 50% de caña cosechada en IEZ. 28.02.2014 Recuperado 22 de Octubre 2015 de <http://www.zafranet.com/2014/02/va-ms-de-50-de-cao-cosechada-en-iez/>.

ZAFRANET. (2015). Esperan que privatización de Ingenios aumente la rentabilidad de la caña.

Zamperlini, G. C. M. (1997). Investigaçãõ da fuligem proveniente da queima de cana-de-açúcar com ênfase nos Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs). Dissertaçãõ de mestrado. PPG/Instituto de Química de Araraquara.

## Anexo 1.

**Tabla 16: Prueba estadística Mann-Whitney para PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en Zacatepec, Morelos.**

Grupo de comparación	Planteamiento de la hipótesis	Intervalo de confianza (1- $\alpha$ )	Probabilidad (U)	Decisión
[PM <sub>2.5</sub> ] CON A.A Y CON A.I	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.A</sub> $\leq$ [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.I</sub> Ha: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.A</sub> $>$ [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.I</sub>	0.95%	6.65X10 <sup>-9</sup>	Se rechaza Ho
[PM <sub>2.5</sub> ] CON A.I Y SIN A	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.I</sub> $\leq$ [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>SIN A</sub> Ha: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.I</sub> $>$ [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>SIN A</sub>	0.95%	0.002	Se rechaza Ho
[PM <sub>2.5</sub> ] CON A.A Y SIN A	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.A</sub> $\leq$ [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>SIN A</sub> Ha: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.A</sub> $>$ [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>SIN A</sub>	0.95%	0.002	Se rechaza Ho
[PM <sub>10</sub> ] CON A.A Y CON A.I	Ho: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.A</sub> $\leq$ [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.I</sub> Ha: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.A</sub> $>$ [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.I</sub>	0.95%	6.64X10 <sup>-9</sup>	Se rechaza Ho
[PM <sub>10</sub> ] CON A.I Y SIN A	Ho: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.I</sub> $\leq$ [PM <sub>10</sub> ] <sub>SIN A</sub> Ha: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.I</sub> $>$ [PM <sub>10</sub> ] <sub>SIN A</sub>	0.95%	0.002	Se rechaza Ho
[PM <sub>10</sub> ] CON A.A Y SIN A	Ho: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.A</sub> $\leq$ [PM <sub>10</sub> ] <sub>SIN A</sub> Ha: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.A</sub> $>$ [PM <sub>10</sub> ] <sub>SIN A</sub>	0.95%	0.002	Se rechaza Ho

Criterio de aceptación; Si  $U \leq \alpha$  se rechaza Ho, por lo tanto, se acepta Ha.

**Tabla 17: Prueba estadística Mann-Whitney para PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en Jojutla, Morelos.**

Grupo de comparación	Planteamiento de la hipótesis	Intervalo de confianza (1- $\alpha$ )	Probabilidad (U)	Decisión
[PM <sub>2.5</sub> ] CON A.A Y CON A.I	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.A</sub> $\leq$ [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.I</sub> Ha: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.A</sub> $>$ [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.I</sub>	0.95%	0.623	Se acepta Ho
[PM <sub>2.5</sub> ] CON A.I Y SIN A	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.I</sub> $\leq$ [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>SIN A</sub> Ha: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.I</sub> $>$ [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>SIN A</sub>	0.95%	0.002	Se rechaza Ho
[PM <sub>2.5</sub> ] CON A.A Y SIN A	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.A</sub> $\leq$ [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>SIN A</sub> Ha: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.A</sub> $>$ [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>SIN A</sub>	0.95%	8.7x10 <sup>-5</sup>	Se rechaza Ho
[PM <sub>10</sub> ] CON A.A Y CON A.I	Ho: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.A</sub> $\leq$ [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.I</sub> Ha: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.A</sub> $>$ [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.I</sub>	0.95%	0.492	Se acepta Ho
[PM <sub>10</sub> ] CON A.I Y SIN A	Ho: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.I</sub> $\leq$ [PM <sub>10</sub> ] <sub>SIN A</sub> Ha: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.I</sub> $>$ [PM <sub>10</sub> ] <sub>SIN A</sub>	0.95%	0.003	Se rechaza Ho
[PM <sub>10</sub> ] CON A.A Y SIN A	Ho: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.A</sub> $\leq$ [PM <sub>10</sub> ] <sub>SIN A</sub> Ha: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.A</sub> $>$ [PM <sub>10</sub> ] <sub>SIN A</sub>	0.95%	8.7x10 <sup>-5</sup>	Se rechaza Ho

Criterio de aceptación; Si  $U \leq \alpha$  se rechaza Ho, por lo tanto, se acepta Ha.

**Tabla 18: Prueba estadística Mann-Whitney para PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en Galeana, Morelos.**

Grupo de comparación	Planteamiento de la hipótesis	Intervalo de confianza (1- $\alpha$ )	Probabilidad (U)	Decisión
[PM <sub>2.5</sub> ] CON A.A Y CON A.I	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ]CON A.A $\leq$ [PM <sub>2.5</sub> ] CON A.I Ha: [PM <sub>2.5</sub> ]CON A.A $>$ [PM <sub>2.5</sub> ] CON A.I	0.95%	0.784	Se acepta Ho
[PM <sub>2.5</sub> ] CON A.I Y SIN A	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ]CON A.I $\leq$ [PM <sub>2.5</sub> ] SIN A Ha: [PM <sub>2.5</sub> ]CON A.I $>$ [PM <sub>2.5</sub> ] SIN A	0.95%	0.012	Se rechaza Ho
[PM <sub>2.5</sub> ] CON A.A Y SIN A	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ]CON A.A $\leq$ [PM <sub>2.5</sub> ] SIN A Ha: [PM <sub>2.5</sub> ]CON A.A $>$ [PM <sub>2.5</sub> ] SIN A	0.95%	0.082	Se acepta Ho
[PM <sub>10</sub> ] CON A.A Y CON A.I	Ho: [PM <sub>10</sub> ]CON A.A $\leq$ [PM <sub>10</sub> ] CON A.I Ha: [PM <sub>10</sub> ]CON A.A $>$ [PM <sub>10</sub> ] CON A.I	0.95%	0.784	Se acepta Ho
[PM <sub>10</sub> ] CON A.I Y SIN A	Ho: [PM <sub>10</sub> ]CON A.I $\leq$ [PM <sub>10</sub> ] SIN A Ha: [PM <sub>10</sub> ]CON A.I $>$ [PM <sub>10</sub> ] SIN A	0.95%	0.012	Se rechaza Ho
[PM <sub>10</sub> ] CON A.A Y SIN A	Ho: [PM <sub>10</sub> ]CON A.A $\leq$ [PM <sub>10</sub> ] SIN A Ha: [PM <sub>10</sub> ]CON A.A $>$ [PM <sub>10</sub> ] SIN A	0.95%	0.05	Se rechaza Ho

Criterio de aceptación; Si  $U \leq \alpha$  se rechaza Ho, por lo tanto, se acepta Ha.

**Tabla 19: Prueba estadística Mann-Whitney para EC en PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en Zacatepec, Morelos.**

Grupo de comparación	Planteamiento de la hipótesis	Intervalo de confianza (1- $\alpha$ )	Probabilidad (U)	Decisión
[EC PM <sub>2.5</sub> ] CON A.A Y CON A.I	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ]CON A.A $\leq$ [PM <sub>2.5</sub> ] CON A.I Ha: [PM <sub>2.5</sub> ]CON A.A $>$ [PM <sub>2.5</sub> ] CON A.I	0.95%	0.002	Se rechaza Ho
[EC PM <sub>2.5</sub> ] CON A.I Y SIN A	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ]CON A.I $\leq$ [PM <sub>2.5</sub> ] SIN A Ha: [PM <sub>2.5</sub> ]CON A.I $>$ [PM <sub>2.5</sub> ] SIN A	0.95%	0.002	Se rechaza Ho
[EC PM <sub>2.5</sub> ] CON A.A Y SIN A	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ]CON A.A $\leq$ [PM <sub>2.5</sub> ] SIN A Ha: [PM <sub>2.5</sub> ]CON A.A $>$ [PM <sub>2.5</sub> ] SIN A	0.95%	$8.7 \times 10^{-5}$	Se rechaza Ho
[EC PM <sub>10</sub> ] CON A.A Y CON A.I	Ho: [PM <sub>10</sub> ]CON A.A $\leq$ [PM <sub>10</sub> ] CON A.I Ha: [PM <sub>10</sub> ]CON A.A $>$ [PM <sub>10</sub> ] CON A.I	0.95%	0.002	Se rechaza Ho
[EC PM <sub>10</sub> ] CON A.I Y SIN A	Ho: [PM <sub>10</sub> ]CON A.I $\leq$ [PM <sub>10</sub> ] SIN A Ha: [PM <sub>10</sub> ]CON A.I $>$ [PM <sub>10</sub> ] SIN A	0.95%	0.002	Se rechaza Ho
[EC PM <sub>10</sub> ] CON A.A Y SIN A	Ho: [PM <sub>10</sub> ]CON A.A $\leq$ [PM <sub>10</sub> ] SIN A Ha: [PM <sub>10</sub> ]CON A.A $>$ [PM <sub>10</sub> ] SIN A	0.95%	$8.7 \times 10^{-5}$	Se rechaza Ho

Criterio de aceptación; Si  $U \leq \alpha$  se rechaza Ho, por lo tanto, se acepta Ha.

**Tabla 20: Prueba estadística Mann-Whitney para OC en PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en Zacatepec, Morelos.**

Grupo de comparación	Planteamiento de la hipótesis	Intervalo de confianza (1- $\alpha$ )	Probabilidad (U)	Decisión
[OC PM <sub>2.5</sub> ] CON A.A Y CON A.I	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.A</sub> ≤ [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.I</sub> Ha: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.A</sub> > [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.I</sub>	0.95%	0.0003	Se rechaza Ho
[OC PM <sub>2.5</sub> ] CON A.I Y SIN A	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.I</sub> ≤ [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>SIN A</sub> Ha: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.I</sub> > [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>SIN A</sub>	0.95%	0.002	Se rechaza Ho
[OC PM <sub>2.5</sub> ] CON A.A Y SIN A	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.A</sub> ≤ [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>SIN A</sub> Ha: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.A</sub> > [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>SIN A</sub>	0.95%	8.7X10 <sup>-5</sup>	Se rechaza Ho
[OC PM <sub>10</sub> ] CON A.A Y CON A.I	Ho: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.A</sub> ≤ [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.I</sub> Ha: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.A</sub> > [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.I</sub>	0.95%	0.008	Se rechaza Ho
[OC PM <sub>10</sub> ] CON A.I Y SIN A	Ho: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.I</sub> ≤ [PM <sub>10</sub> ] <sub>SIN A</sub> Ha: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.I</sub> > [PM <sub>10</sub> ] <sub>SIN A</sub>	0.95%	0.002	Se rechaza Ho
[OC PM <sub>10</sub> ] CON A.A Y SIN A	Ho: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.A</sub> ≤ [PM <sub>10</sub> ] <sub>SIN A</sub> Ha: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.A</sub> > [PM <sub>10</sub> ] <sub>SIN A</sub>	0.95%	8.7X10 <sup>-5</sup>	Se rechaza Ho

Criterio de aceptación; Si  $U \leq \alpha$  se rechaza Ho, por lo tanto, se acepta Ha.

**Tabla 21: Prueba estadística Mann-Whitney para CT en PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en Zacatepec, Morelos.**

Grupo de comparación	Planteamiento de la hipótesis	Intervalo de confianza (1- $\alpha$ )	Probabilidad (U)	Decisión
[CT PM <sub>2.5</sub> ] CON A.A Y CON A.I	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.A</sub> ≤ [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.I</sub> Ha: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.A</sub> > [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.I</sub>	0.95%	0.0004	Se rechaza Ho
[CT PM <sub>2.5</sub> ] CON A.I Y SIN A	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.I</sub> ≤ [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>SIN A</sub> Ha: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.I</sub> > [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>SIN A</sub>	0.95%	0.002	Se rechaza Ho
[CT PM <sub>2.5</sub> ] CON A.A Y SIN A	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.A</sub> ≤ [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>SIN A</sub> Ha: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.A</sub> > [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>SIN A</sub>	0.95%	8.7X10 <sup>-5</sup>	Se rechaza Ho
[CT PM <sub>10</sub> ] CON A.A Y CON A.I	Ho: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.A</sub> ≤ [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.I</sub> Ha: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.A</sub> > [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.I</sub>	0.95%	0.0004	Se rechaza Ho
[CT PM <sub>10</sub> ] CON A.I Y SIN A	Ho: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.I</sub> ≤ [PM <sub>10</sub> ] <sub>SIN A</sub> Ha: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.I</sub> > [PM <sub>10</sub> ] <sub>SIN A</sub>	0.95%	0.002	Se rechaza Ho
[CT PM <sub>10</sub> ] CON A.A Y SIN A	Ho: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.A</sub> ≤ [PM <sub>10</sub> ] <sub>SIN A</sub> Ha: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.A</sub> > [PM <sub>10</sub> ] <sub>SIN A</sub>	0.95%	8.7X10 <sup>-5</sup>	Se rechaza Ho

Criterio de aceptación; Si  $U \leq \alpha$  se rechaza Ho, por lo tanto, se acepta Ha.

**Tabla 22: Prueba estadística Mann-Whitney para EC en PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en Jojutla, Morelos.**

Grupo de comparación	Planteamiento de la hipótesis	Intervalo de confianza (1- $\alpha$ )	Probabilidad (U)	Decisión
[ECPM <sub>2.5</sub> ] CON A.A Y CON A.I	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.A</sub> ≤ [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.I</sub> Ha: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.A</sub> > [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.I</sub>	0.95%	0.154	Se rechaza Ho
[ECPM <sub>2.5</sub> ] CON A.I Y SIN A	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.I</sub> ≤ [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>SIN A</sub> Ha: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.I</sub> > [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>SIN A</sub>	0.95%	0.002	Se rechaza Ho
[ECPM <sub>2.5</sub> ] CON A.A Y SIN A	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.A</sub> ≤ [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>SIN A</sub> Ha: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.A</sub> > [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>SIN A</sub>	0.95%	4.9X10 <sup>-4</sup>	Se rechaza Ho
[ECPM <sub>10</sub> ] CON A.A Y CON A.I	Ho: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.A</sub> ≤ [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.I</sub> Ha: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.A</sub> > [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.I</sub>	0.95%	0.768	Se acepta Ha
[ECPM <sub>10</sub> ] CON A.I Y SIN A	Ho: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.I</sub> ≤ [PM <sub>10</sub> ] <sub>SIN A</sub> Ha: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.I</sub> > [PM <sub>10</sub> ] <sub>SIN A</sub>	0.95%	0.002	Se rechaza Ho
[ECPM <sub>10</sub> ] CON A.A Y SIN A	Ho: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.A</sub> ≤ [PM <sub>10</sub> ] <sub>SIN A</sub> Ha: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.A</sub> > [PM <sub>10</sub> ] <sub>SIN A</sub>	0.95%	0.003	Se rechaza Ho

Criterio de aceptación; Si  $U \leq \alpha$  se rechaza Ho, por lo tanto, se acepta Ha.

**Tabla 23: Prueba estadística Mann-Whitney para OC en PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en Jojutla, Morelos.**

Grupo de comparación	Planteamiento de la hipótesis	Intervalo de confianza (1- $\alpha$ )	Probabilidad (U)	Decisión
[OCPM <sub>2.5</sub> ] CON A.A Y CON A.I	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.A</sub> ≤ [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.I</sub> Ha: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.A</sub> > [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.I</sub>	0.95%	0.016	Se rechaza Ho
[OCPM <sub>2.5</sub> ] CON A.I Y SIN A	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.I</sub> ≤ [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>SIN A</sub> Ha: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.I</sub> > [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>SIN A</sub>	0.95%	0.003	Se rechaza Ho
[OCPM <sub>2.5</sub> ] CON A.A Y SIN A	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.A</sub> ≤ [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>SIN A</sub> Ha: [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>CON A.A</sub> > [PM <sub>2.5</sub> ] <sub>SIN A</sub>	0.95%	8.6X10 <sup>-5</sup>	Se rechaza Ho
[OCPM <sub>10</sub> ] CON A.A Y CON A.I	Ho: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.A</sub> ≤ [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.I</sub> Ha: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.A</sub> > [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.I</sub>	0.95%	0.128	Se acepta Ha
[OCPM <sub>10</sub> ] CON A.I Y SIN A	Ho: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.I</sub> ≤ [PM <sub>10</sub> ] <sub>SIN A</sub> Ha: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.I</sub> > [PM <sub>10</sub> ] <sub>SIN A</sub>	0.95%	0.121	Se rechaza Ho
[OCPM <sub>10</sub> ] CON A.A Y SIN A	Ho: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.A</sub> ≤ [PM <sub>10</sub> ] <sub>SIN A</sub> Ha: [PM <sub>10</sub> ] <sub>CON A.A</sub> > [PM <sub>10</sub> ] <sub>SIN A</sub>	0.95%	4.9x10 <sup>-4</sup>	Se rechaza Ho

Criterio de aceptación; Si  $U \leq \alpha$  se rechaza Ho, por lo tanto, se acepta Ha.

**Tabla 24 : Prueba estadística Mann-Whitney para CT en PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en Jojutla, Morelos.**

Grupo de comparación	Planteamiento de la hipótesis	Intervalo de confianza (1- $\alpha$ )	Probabilidad (U)	Decisión
[ CT PM <sub>2.5</sub> ] CON A.A Y CON A.I	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ]CON A.A $\leq$ [PM <sub>2.5</sub> ] CON A.I Ha: [PM <sub>2.5</sub> ]CON A.A > [PM <sub>2.5</sub> ] CON A.I	0.95%	0.03	Se rechaza Ho
[ CT PM <sub>2.5</sub> ] CON A.I Y SIN A	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ]CON A.I $\leq$ [PM <sub>2.5</sub> ] SIN A Ha: [PM <sub>2.5</sub> ]CON A.I > [PM <sub>2.5</sub> ] SIN A	0.95%	0.003	Se rechaza Ho
[ CT PM <sub>2.5</sub> ] CON A.A Y SIN A	Ho: [PM <sub>2.5</sub> ]CON A.A $\leq$ [PM <sub>2.5</sub> ] SIN A Ha: [PM <sub>2.5</sub> ]CON A.A > [PM <sub>2.5</sub> ] SIN A	0.95%	8.7X10 <sup>-5</sup>	Se rechaza Ho
[ CT PM <sub>10</sub> ] CON A.A Y CON A.I	Ho: [PM <sub>10</sub> ]CON A.A $\leq$ [PM <sub>10</sub> ] CON A.I Ha: [PM <sub>10</sub> ]CON A.A > [PM <sub>10</sub> ] CON A.I	0.95%	0.155	Se acepta Ha
[ CT PM <sub>10</sub> ] CON A.I Y SIN A	Ho: [PM <sub>10</sub> ]CON A.I $\leq$ [PM <sub>10</sub> ] SIN A Ha: [PM <sub>10</sub> ]CON A.I > [PM <sub>10</sub> ] SIN A	0.95%	0.02	Se rechaza Ho
[ CT PM <sub>10</sub> ] CON A.A Y SIN A	Ho: [PM <sub>10</sub> ]CON A.A $\leq$ [PM <sub>10</sub> ] SIN A Ha: [PM <sub>10</sub> ]CON A.A > [PM <sub>10</sub> ] SIN A	0.95%	0.0006	Se rechaza Ho

Criterio de aceptación; Si  $U \leq \alpha$  se rechaza Ho, por lo tanto, se acepta Ha.