

## Análisis de la dispersión de partículas PM 2.5 en la ciudad de Guanajuato

Carlos Aguirre C., Lineth Anahí Mayagoitia A., Paola Granados L., Juan Carlos González M., Ixchel Zazilha Ximena Cardiel R., Lidia Karina Celio A., Alejandro De La Peña T.  
División de Ingenierías, Departamento de Ingenierías Civil y Ambiental. Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato. AV. Juárez #77; Zona centro; Guanajuato, CP 36000.

c.aguirrecerda@ugto.mx., la.mayagoitiaaceves@ugto.mx., p.granadoslopez@ugto.mx., jc.gonzalezmontes@ugto.mx., izx.cardielramirez@ugto.mx., lk.celioacosta@ugto.mx., a.delapena@ugto.mx.

### Resumen.

El material particulado (PM) es una mezcla de partículas en el aire, clasificadas en PM10 y PM2.5 según su tamaño. La OMS establece límites para asegurar una buena calidad del aire: 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  anuales y 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en 24 horas para PM10. En México, la NOM-025-SSA1-2014 fija límites para PM10 (40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  anuales y 75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en 24 horas) y PM2.5 (12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  anuales y 45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en 24 horas).

Las PM2.5 son especialmente peligrosas por su capacidad de penetrar profundamente en el sistema respiratorio, causando enfermedades y aumentando la mortalidad prematura. También impactan el medio ambiente y contribuyen al cambio climático.

En Guanajuato, el crecimiento comercial ha incrementado las emisiones de PM2.5. Para analizar la dispersión de estas partículas, se usaron herramientas de simulación y georreferenciación, como AERMET View, QGIS, Google Earth Pro y POWER DAVE. El estudio busca identificar las fuentes principales de PM2.5 en los negocios de Guanajuato, analizar su dispersión y evaluar las condiciones meteorológicas que afectan su concentración.

### Abstract.

Particulate matter (PM) is a mixture of particles in the air, classified into PM10 and PM2.5 according to their size. The WHO establishes limits to ensure good air quality: 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  annually and 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  in 24 hours for PM10. In Mexico, NOM-025-SSA1-2014 sets limits for PM10 (40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  annually and 75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  in 24 hours) and PM2.5 (12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  annually and 45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  in 24 hours).

PM2.5 is especially dangerous because of its ability to penetrate deep into the respiratory system, causing illness and increasing premature mortality. They also impact the environment and contribute to climate change.

In Guanajuato, commercial growth has increased PM2.5 emissions. To analyze the dispersion of these particles, simulation and georeferencing tools such as AERMET View, QGIS, Google Earth Pro and POWER DAVE were used. The study seeks to identify the main sources of PM2.5 in Guanajuato businesses, analyze their dispersion and evaluate the meteorological conditions that affect their concentration.

**Palabras clave:** Concentraciones, materiales particulados, emisiones, medio ambiente, cambio climático, leña, carbón PM 2.5.

### Introducción.

El material particulado (PM) es una mezcla de partículas suspendidas en el aire. Pueden variar en tamaño, forma y composición química, y se clasifican en dos categorías principales: PM10 (partículas de 10 micrómetros de diámetro) y PM2.5 (partículas de 2.5 micrómetros) (WHO, 2013).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha definido estándares para asegurar una buena calidad del aire, proporcionando valores guía para contaminantes específicos. Para el material particulado, el límite máximo permitido para PM10 es de 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  como promedio anual. Para exposiciones cortas, como en un periodo de 24 horas, el valor establecido es de 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Campo et al., 2017). En México, los parámetros legales para estos contaminantes se encuentran en la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, que regula la salud ambiental y establece límites permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente. Esta norma establece un límite anual de 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y un límite de 75  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para un periodo de 24 horas para PM10. Para PM2.5, se establece un límite anual de 12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y un límite de 24 horas de 45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (DOF, 2014).

Las partículas PM2.5 son de particular preocupación debido a su capacidad para penetrar profundamente en el sistema respiratorio humano. Estas partículas son lo suficientemente pequeñas como para eludir las defensas del sistema respiratorio superior y alcanzar los bronquiolos y los alvéolos pulmonares (Pope & Dockery, 2006). Una vez inhaladas, pueden causar problemas de salud, incluyendo enfermedades respiratorias y cardiovasculares, y se vinculan a un aumento en la mortalidad prematura (Brook et al., 2010). Las partículas PM2.5 tienen impactos en el medio ambiente. Contribuyen a la formación de smog y a la reducción de la visibilidad, afectan la calidad del agua y del suelo y pueden transportar contaminantes tóxicos a largas distancias (EPA, 2016). Además, las partículas PM2.5 juegan un papel en el cambio climático, tanto al actuar como núcleos de condensación de nubes, afectando la formación de nubes y la precipitación, como al absorber o reflejar la radiación solar, influenciando así el balance energético de la Tierra (IPCC, 2013).

La ciudad de Guanajuato se ubica dentro de las coordenadas 21° 00' 17" y 21° 03' 30" LN, 101° 15' 00" y 101° 18' 00" LO, a una altitud de aproximadamente 2,000 metros sobre el nivel del mar, en la región central del estado de Guanajuato, México. Ocupa una superficie de 996.74 km<sup>2</sup> en una región montañosa, caracterizada por un relieve accidentado. Al norte, colinda con los municipios de Dolores Hidalgo y San Felipe; al este con Silao y León; al sur con Irapuato y al oeste con el municipio de León. Con una población de aproximadamente 195,000 habitantes según el censo del INEGI 2020 (INEGI, 2020). La ciudad ha experimentado un crecimiento poblacional significativo y la actividad comercial ha aumentado en las últimas décadas, lo que ha llevado a un alza en la generación de material particulado. Los negocios, tanto grandes como pequeños, son fuentes significativas de emisiones de PM2.5 debido a la quema de combustibles y otras actividades relacionadas (Zhang et al., 2016). Las actividades económicas consideradas para este artículo fueron los negocios de comida, que emplean combustibles como el carbón y la leña. En la figura 1 se muestran los diferentes factores de emisión para uso de carbón, y en la figura 2 se muestran los distintos factores de emisión para el uso de leña (Suh Y. Lee, 2020).

Factor de Emisión g/kg de Carbon										
CO2	CH4	N2O	CO	NO3	TNMOC	TNMHC	PST	PM10	PM2.5	REFERENCIA
2570	7.8	Factor de E	210			4				Smith (1994)
	4		45	1.5				2.6	1.35	EPA(1995)
2943.1	5.9	0.029	206.5	2.95	2.95					IPCC (1997)
2280	2.92		71.3	0.91		0.664	1.3			Zhang et al. (2000)
2611	6.2	0.2	200	3.9						9 Andrese y Mariet (2002)
1703			40	2.34			1.95			Battacharya y Abdul-Sala
2402	6.88		134	1.41	7.31					Berischi et al (2003)
										Yokelson et al (2008)
										Chrisitan et al (2010)
2385	5.29	0.24	189	1.41	5.56		2.38			Akagi et al (2011)
										Padilla-Barrera et al (201
2500	6	0.54	207	2.3	11					3 Andree (2019)
2424.26	5.62	0.2	144.76	2.09	6.16	0.664	1.88	2.5	4.45	PROMEDIO.
(+/-353.57)	(+/- 1.56)	(+/-0.13)	(+/-73.66)	(+/-0.98)	(+/-3.17)		(+/- 0.54)		(+/- 4.03)	

Figura 1. Factores de emisión para el carbón.

CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CO	NO <sub>x</sub>	TNMOC	TNMHC	PST	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>	Referencia
1620	9		99		12					Smith (1994)
1700	4.8		115.4	1.4	26.5			15.3	1.84	EPA (1995)
1446.6	4.35	0.058	72.5	1.45	8.7					IPCC (1997)
1520	5.06		69.2	1.19		4.34	3.82			Zhang et al. (2000)
1550	6.1	0.06	78	1.1					7.2	Andraee y Marlet (2001)
1609	3.95	0.049	38.2							Battacharya y Abdul-Salam (2002)
1525	10.4		96	2.04	26.78					Bertchi et al. (2003)
1677	3.82		57.46	1.67					9.93	Yokelson et al. (2008)
1724	3.35		58.4		4.46				6.73	Christian et al (2010)
1548	4.86		77	1.42	19.2	2.27	4.55	18.4	6.64	Akagi et al. (2011)
1364	3.2		51.62	0.87					2.11	Padilla-Barrera et al. (2019)
1550	6.8	0.07	83	1.3	58				6.8	Andraee (2019)
1569.5	5.47	0.06	76.65	1.38	22.23	3.31	4.19	16.82	5.89	
(± 104.25)	(± 2.25)	(± 0.01)	(± 21.84)	(± 0.34)	(± 17.94)				(± 2.91)	Promedio

Figura 2. Factores de emisión para la leña.

Para comprender mejor la generación y dispersión del material particulado en Guanajuato, se realizaron análisis utilizando diversas herramientas de simulación y georreferenciación. Se emplearon softwares como AERMET View para modelar la dispersión de las partículas, QGIS y Google Earth Pro para la visualización y

análisis geoespacial, y POWER DAVE para obtener datos meteorológicos precisos. Estos programas permiten una evaluación detallada de las fuentes de generación de PM<sub>2.5</sub> y un análisis de cómo las condiciones meteorológicas influyen en su movimiento y concentración en la atmósfera.

## Objetivo

El objetivo de este estudio es identificar las principales fuentes de PM<sub>2.5</sub> generadas por los negocios que emplean combustibles como leña y carbón en Guanajuato, analizar la dispersión de estas partículas y evaluar las condiciones meteorológicas que afectan su concentración.

## Objetivos Particulares

- 1.- Análisis anual de la dispersión de las partículas PM 2.5, en la ciudad de Guanajuato Capital, del periodo de enero de 2023 al 17 de junio de 2024.
- 2.- Comparación de la dispersión de las partículas PM 2.5 de la semana Santa del año 2023 y 2024.
- 3.- Análisis de dispersión de partículas PM 2.5 en el Festival Cervantino del año 2023.
- 4.- Análisis de dispersión de partículas PM 2.5 en una semana de baja poblacional flotante (turismo y estudiantes).

## Metodología

Se recopiló información acerca de sitios de emisión de material particulado tales como negocios de pollo rostizado, hamburguesas al carbón, cafeterías (con máquina de café), y pan a la leña, en los alrededores de la zona centro de Guanajuato, Guanajuato, haciendo uso de la herramienta de POWER DAVE y el mapa satelital de Google Maps y Google Earth para la ubicación de los sitios y la obtención de sus coordenadas, se tomó el factor de emisión de la EPA de las figuras 1 y 2. Como se observa en la figura 3, a través de la herramienta de información geográfica de QGIS 3.36.6 se crearon archivos de terminación .shp sobre un mapa de la zona centro de Guanajuato señalando las ubicaciones y la extensión de tales negocios para posteriormente exportarlos al sistema de modelado de dispersión atmosférica AERMOD view del Software Lakes Enviromental.



Figura 3. Integración de .SHP al mapa de la ciudad de Guanajuato por QGIS.

Se trazó un perímetro en la zona centro de Guanajuato, Guanajuato, haciendo uso de la aplicación de AERMET, la cual proyecta los datos proporcionados en la aplicación de Google Earth Pro como se observa en la figura 4. El perímetro se hizo en base a la primera coordenada registrada, del negocio de pollo rostizado a la leña localizado en la calle Juárez de la zona centro de Guanajuato Capital con las coordenadas, 21.017006, -101.256554.

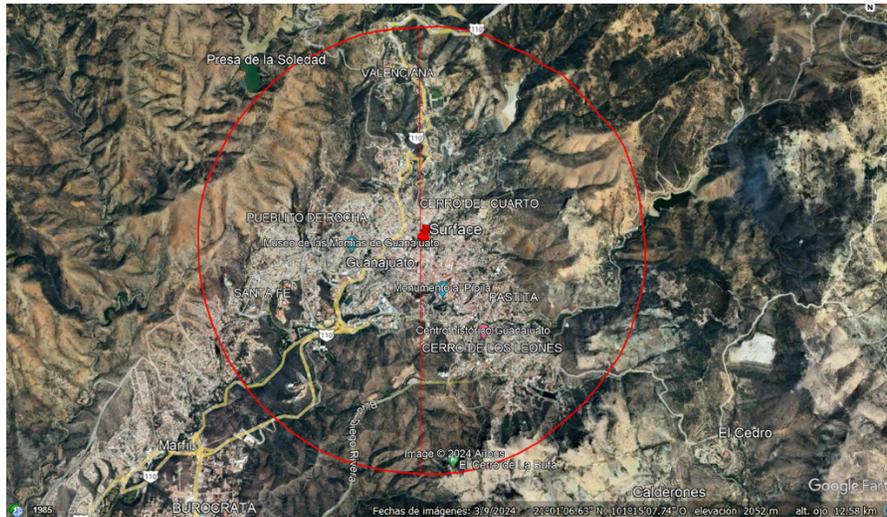


Figura 4. Área de estudio visión Google Earth.

Se creó un archivo de Excel con la información obtenida a partir del geo portal climático de la NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) Data Access Viewer Enhanced (DAVe), accediendo a los datos monitoreados en el estado de Guanajuato durante el periodo entre el 1 de enero del 2023 al 17 de junio del 2023 cada hora generando 12378 datos, se descargaron los datos de la temperatura de bulbo seco a 2 metros ( $^{\circ}\text{C}$ ), humedad relativa a 2 metros (%), dirección del viento a 2 metros (grados), presión atmosférica (KPa) y radiación ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), agregando además la altura sobre el mar promedio del perímetro. Este archivo se usó para subir la información en el archivo de AERMET.

Cuando se completó la información proyectada con AERMET y la compilación de datos meteorológicos, se exportó el archivo de terminación .SFC a la aplicación de AERMOD view. Los archivos de terminación .shp fueron exportados a la aplicación de AERMOD view para su posterior proyección 3D, en la cual se agregaron las chimeneas emisoras de material particulado considerando medidas con estimaciones a escala, tomando en cuenta un promedio de altura para los edificios de 7 metros y para las chimeneas una altura por encima del edificio de 2 a 3 metros, y se agregaron los factores del terreno considerando a 900m sobre el suelo para la correcta estimación de la dispersión de los contaminantes. Se empleó una fórmula para obtener la velocidad de dispersión de material particulado de la leña y el carbón:

$$Q=FE*C$$

Donde Q representa el flujo (g/s), FE el factor de emisión (g/kg) y C el consumo promedio (Kg/s), se agregaron los resultados a la información para cada chimenea junto con los datos de temperatura de gases ( $^{\circ}\text{C}$ ), diámetro de chimenea (m) y velocidad del gas (m/s). Se tomaron los factores de emisión en base al uso de carbón o leña correspondiente a cada establecimiento, así como el consumo promedio de los mismos mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Información de consumo de leña y carbón para establecimientos de pollos y hamburguesas.

Categoría	Negocio	Combustible	Producción (día <sup>-1</sup> )	Número de establecimientos	Consumo diario por establecimiento (kg d <sup>-1</sup> )	Consumo anual por categoría (kg año <sup>-1</sup> )
Pequeño	Hamburguesa	Carbón	50>	2	15.94(+/-7.95)	11,636.2 (+/- 5803.5)
Mediano	Pollo	Leña	50-100	4	138.91(+/- 52.20)	202,808.6 (+/- 76,212)
Grande	Pollo	Carbón	100>	2	81.25(+/- 28.37)	59,312.5 (+/- 20,710.1)

Los parámetros manejados en las chimeneas de leña fueron el factor de emisión de 0.00296 g/s, la temperatura de salida del gas de 543,15 K y la velocidad de emisión de 1.5 m/s, mientras que para las chimeneas de carbón los datos utilizados fueron un factor de emisión de 0.00217 g/s, la temperatura de salida del gas de 673,15 K y la velocidad de emisión de 2 m/s. Una vez cargados los datos para cada chimenea fue posible correr la simulación en el programa de AERMOD, seleccionando distintas fechas a partir del 1 de enero del 2023 hasta el 17 de junio del 2024, permitiendo observar las variaciones en la dispersión de los contaminantes según las condiciones climáticas presentes en la región. Se realizó una simulación para la semana santa del 2023 y la semana santa del 2024 para analizarlo en una comparación de ambos años, un estudio en octubre del 2023 correspondiente al festival cervantino y una semana de baja presencia turística y estudiantil, la primera semana de enero del 2024.

## Resultados.

### **Análisis anual de la dispersión de las partículas PM 2.5, en la ciudad de Guanajuato Capital, del periodo 1 de enero de 2023 al 17 de junio de 2024.**

Los resultados fueron recopilados en la figura 5a y 5b, las cuales representan a las simulaciones de un periodo específico de tiempo del 1 de enero 2023 hasta 17 de junio del 2024, se muestra la imagen obtenida con el software AERMOD view y Google Earth Pro para una interpretación más completa. Los colores representan los niveles de concentración de PM2.5 en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  que corresponden a la zona señalada, estos están descritos en la tabla 3.

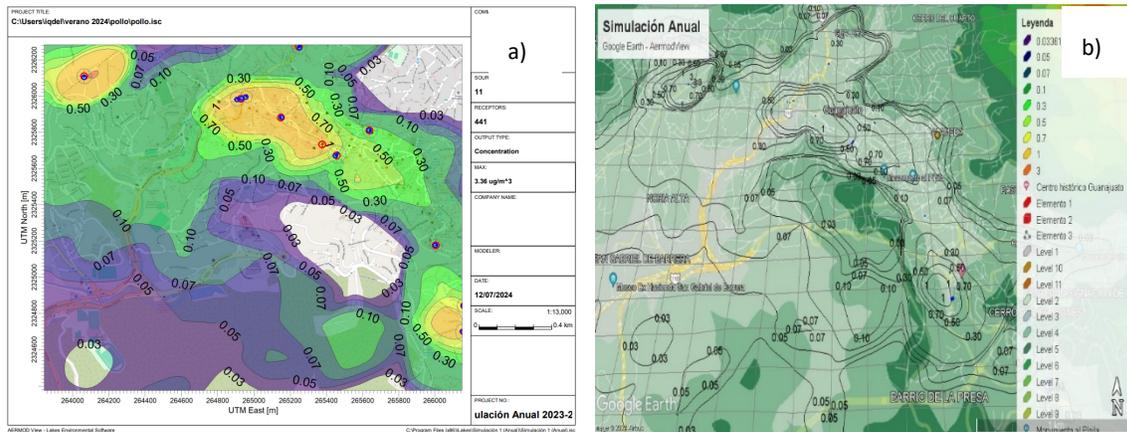


Figura 5a, simulación anual en Aermod View para dispersión de partículas PM 2.5 del periodo 1 Ene del 2023 al 17 de Jun del 2024, 5b, integración del espectro de dispersión de partículas PM 2.5 en Google Earth.

Tabla 2. Interpretación colorimétrica de las distintas concentraciones de las partículas PM 2.5 en la simulación de AERMOD View.

#	Level	Color
1	3.36126	Red
2	3	Orange
3	1	Yellow
4	0.7	Light Green
5	0.5	Green
6	0.3	Light Green
7	0.1	Teal
8	0.07	Blue
9	0.05	Dark Blue
10	0.03361	Purple

La variación de la concentración de PM 2.5 con respecto a las variables meteorológicas se muestran en la figura 5a, donde puede observarse que la concentración de PM 2.5 en la zona centro de la ciudad de Guanajuato tiende a incrementarse teniendo un máximo de concentración de un  $1\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Sin embargo, también existe un incremento de las concentraciones en la zona de embajadoras, la zona de 2 ríos cercano a la glorieta, y en la zona de pueblito de rocha. Estos puntos naranjas indican mayor concentración de PM 2.5 y es donde se localizan los negocios de pollo a la leña y al carbón. En la figura 5b se representa la simulación en Google Earth, en donde se muestra con mayor detalle la dispersión de las partículas PM 2.5 a través de la ciudad, de este modo se aprecia que el alcance de dispersión es muy amplio principalmente hacia la zona sur de la ciudad de Guanajuato y poca presencia hacia la zona norte conforme se aleja del punto de emisión o control, la concentración de las partículas PM 2.5 va en decaimiento hasta alcanzar concentraciones de  $0.05\mu\text{g}/\text{m}^3$ , esto es debido a que los vientos de la ciudad de Guanajuato durante este periodo analizado fueron predominantes del norte al sur de acuerdo a los datos obtenidos por el sistema meteorológico espacial de la NASA.

#### ***Comparación de la dispersión de las partículas PM 2.5 de la semana Santa del año 2023 y 2024.***

En la figura 6a se muestra la simulación de la semana santa del año 2023, y la figura 6b se muestra la simulación de la semana santa del año 2024, podemos observar en la figura 6a que las concentraciones son mayores en la zona centro de la ciudad de Guanajuato. En los puntos de control que representan a los restaurantes o negocios en estudio cabe destacar que las concentraciones marcadas en color naranja son concentraciones cercanas a un microgramo por metro cúbico, también podemos observar que la dispersión de las partículas PM 2.5 presentan una tendencia hacia la zona sur de manera predominante y hacia la zona norte muy baja dispersión conforme avanza la distancia de dispersión esta tiende a disminuir llegando a los  $0.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ , sin embargo, las concentraciones de las partículas PM 2.5 con concentraciones de 0.8 a  $1\mu\text{g}/\text{m}^3$  tiene una distribución casi lineal entre los puntos de estudio esto se debe a la morfología de la propia ciudad ya que al ser una cañada los vientos tienden a concentrarse en la zona centro de la ciudad es por ello que observamos una conexión entre los puntos de estudio aunque se encuentren a distintas distancias u ubicaciones en la ciudad.

En la figura 6b se muestra la simulación de la Semana Santa del 2024 para su comparación a la Semana Santa del 2023 en la concentración de las partículas PM 2.5. Es evidente el incremento de la dispersión de las partículas PM 2.5 en los puntos de control, alcanzando concentraciones hasta de  $1\mu\text{g}/\text{m}^3$  comparado con la Semana Santa del año del 2023, de acuerdo a las fuentes publicadas en los portales como el cuadratín, y los boletines propios de la presidencia municipal de la ciudad de Guanajuato capital publican los marcadores de visitantes de turistas marcando que en la Semana Santa del año del 2023 se recibieron cerca de 93,142 turistas y una derrama de 120,000,000 de pesos, sin embargo en la Semana Santa del 2024 se recibieron cerca de 145,000 turistas generando una derrama de 133,000,000 de pesos. Este incremento poblacional se refleja claramente en las simulaciones realizadas ya que las concentraciones generadas por partículas PM 2.5 se incrementaron principalmente en los negocios de pollos al carbón y en el centro de la ciudad ya que es la zona más concurrida en épocas de Semana Santa, sin embargo tanto en la zona de embajadoras como la zona de 2 ríos y pueblito de rocha también se presenta un leve incremento en las partículas PM 2.5, alcanzando concentraciones hasta de punto  $8\mu\text{g}/\text{m}^3$ , la dispersión de las partículas PM 2.5 sigue teniendo una tendencia hacia la zona centro y zona sur de la ciudad debido a los vientos presentes en las épocas del mes, existen estudios (Zamorategui, et. al.2022), que demuestran que los meses de marzo a mayo son meses con mayor presencia de vientos, provocando que exista una mayor distribución de las partículas PM 2.5 en la ciudad de Guanajuato.

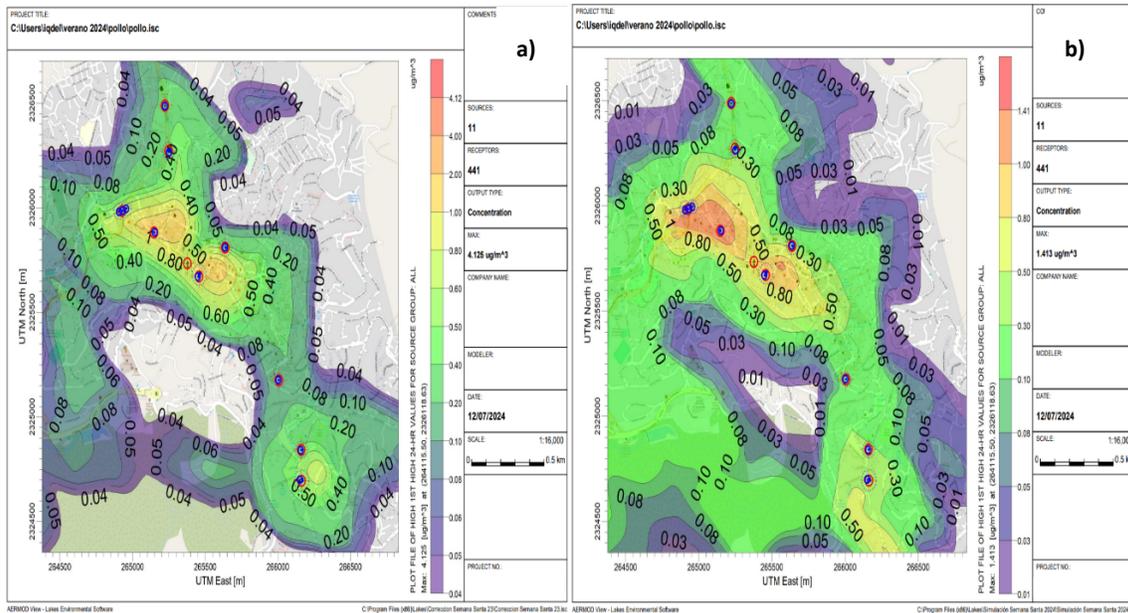


Figura 6a simulación de la dispersión de partículas PM 2.5 sobre la ciudad de Guanajuato correspondiente a la semana Santa del año 2023, figura 6b, simulación de la dispersión de partículas PM 2.5 sobre la ciudad de Guanajuato correspondiente a la semana Santa del año 2024.

**Análisis de dispersión de partículas PM 2.5 en el Festival Cervantino del año 2023.**

En la figura 7 se muestra el análisis que se realizó de la dispersión de las partículas PM 2.5 en la ciudad de Guanajuato en el mes de octubre del año 2023 que corresponde a los días del festival cervantino, como bien pueden observarse en este caso las concentraciones de las partículas PM 2.5 fueron principalmente superiores a 0.8 hasta 4.40 µg/m<sup>3</sup> en los puestos de hamburguesas al carbón, lo que indica que el mayor consumo durante este festival fueron las hamburguesas y en la zona centro donde se localizan las pollerías al carbón sus concentraciones de partículas PM 2.5 fueron por debajo de 0.8 µg/m<sup>3</sup>. La dispersión de las partículas PM 2.5 alrededor de Guanajuato es mayor comparado a los estudios anteriores, porque en octubre en la ciudad de Guanajuato capital hay vientos de moderados a fuertes, lo que provoca la distribución y dispersión de las partículas PM 2.5 en la ciudad de Guanajuato, en la tabla 3 se muestra la interpretación colorimétrica de las distintas concentraciones de las partículas PM 2.5 en la simulación de AERMOD View.

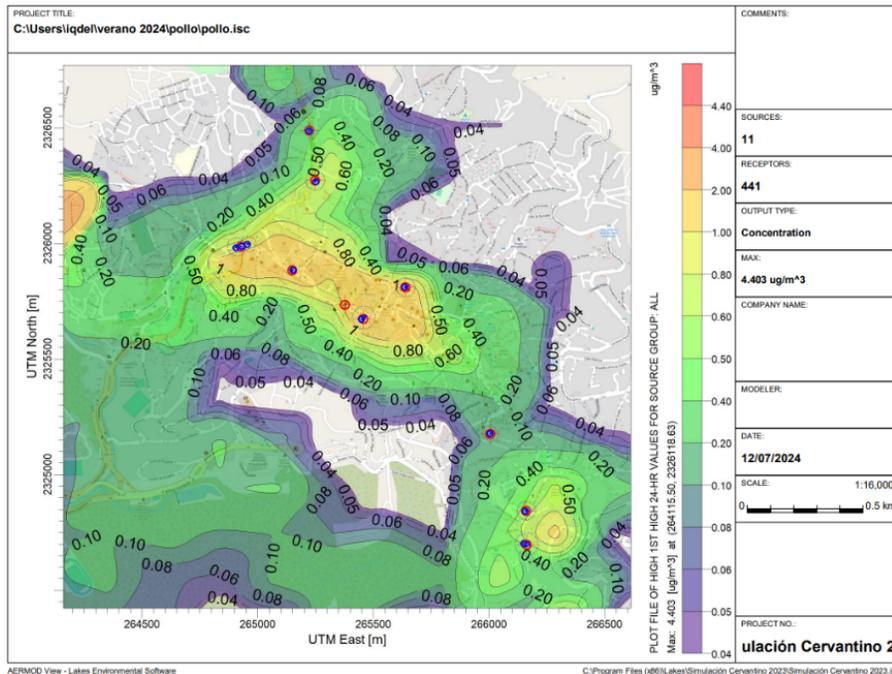


Figura 7. Simulación de la dispersión de las partículas PM 2.5 correspondiente al Festival Cervantino del año 2023 vista AERMOD View.

Tabla 3. Interpretación colorimétrica de las distintas concentraciones de las partículas PM 2.5 en la simulación de AERMOD View correspondiente al Festival Cervantino 2023.

#	Level	Color
1	4.40285	
2	4	
3	2	
4	1	
5	0.8	
6	0.6	
7	0.5	
8	0.4	
9	0.2	
10	0.1	
11	0.08	
12	0.06	
13	0.05	

**Análisis de dispersión de partículas PM 2.5 en una semana baja de baja poblacional flotante (turismo y estudiantes).**

En la figura 8 se realizó una simulación en la primera semana de enero del 2024, eligiéndose una semana con poca presencia turística y sin presencia de estudiantes. Se puede observar que existe una disminución de la dispersión de partículas PM 2.5 comparada con los estudios anteriores. Claramente se observa que en la zona centro, donde se localizan las pollerías de leña y de carbón, se generan partículas PM 2.5 con concentraciones de 0.05  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , lo que significa que hay una disminución de consumo de dichos productos. Lo mismo se observa con las hamburguesas al carbón, presentando concentraciones muy semejantes a las de las pollerías. Sin embargo, aunque las emisiones de partículas PM 2.5 son bajas, debido a los vientos de la ciudad y a su geología de cañada, las partículas PM 2.5 alcanzan a recorrer gran parte de la ciudad de Guanajuato, llegando con bajas concentraciones hasta 0.01  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en la zona norte y zona sur de la ciudad.

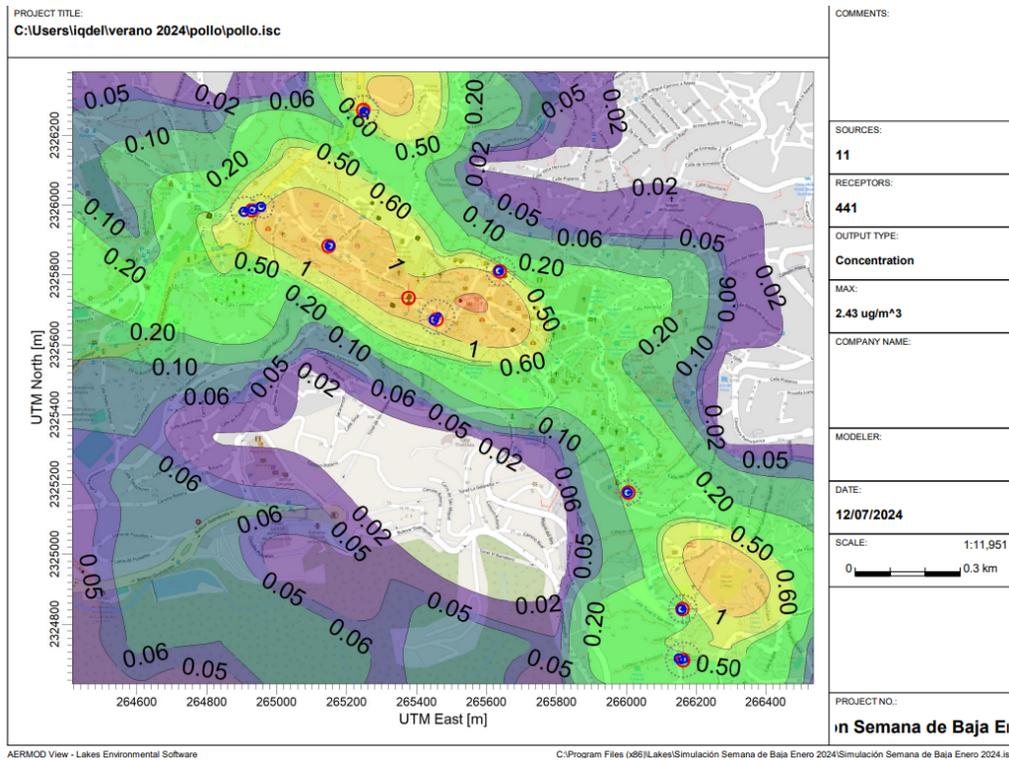


Figura 8. Análisis de dispersión de partículas PM 2.5 en una semana baja de baja poblacional flotante (turismo y estudiantes).

## Conclusiones.

La concentración de PM 2.5 de promedio anual en la ciudad de Guanajuato generado por los restaurantes de pollos a la leña, pollos al carbón, así como las hamburguesas callejeras hechas con carbón presentaron una concentración cercana a  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , resaltando la línea de la zona centro de la ciudad, esto es debido a que la morfología de la misma ciudad al ser una cañada los vientos predominantes recorren hacia el centro de la ciudad para después ir hacia la zona sur como se pudo observar la dispersión de los contaminantes PM 2.5 se distribuyeron con dirección hacia la zona sur de la ciudad de Guanajuato y con muy baja presencia hacia la zona norte.

La dispersión de las partículas de PM 2.5 en Guanajuato fue influenciada por los patrones estacionales de viento y la actividad humana. En enero y octubre, los vientos predominantes del norte y noreste concentran las partículas hacia el sur y suroeste de la ciudad, debido a la estabilidad atmosférica que mantiene las partículas cerca del suelo. Durante Semana Santa, la variabilidad de los vientos provoca una dispersión más irregular, con una mezcla atmosférica que puede reducir las concentraciones en ciertas áreas, aunque en días con vientos menos variables, las concentraciones pueden permanecer altas cerca de las fuentes de emisión.

Las simulaciones muestran que las concentraciones de PM 2.5 son mayores en áreas con actividad comercial intensa, como el centro de la ciudad, Embajadoras, Dos Ríos, y Pueblito de Rocha, donde se ubican negocios que utilizan leña y carbón. En eventos como el Cervantino en donde comercios de comida suelen llegar a su mayor número de clientes, la dispersión de PM 2.5 se incrementa debido a vientos más fuertes en octubre y el movimiento de la actividad y consumo humano, alcanzando concentraciones superiores a  $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en los puestos de hamburguesas al carbón.

El punto de la ciudad en los que se encuentran las concentraciones más altas (rebasando los  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) es la calle Juan Valle en zona centro, y sus alrededores, como la intersección que tiene con calle Positos. En casi todos los periodos, esta ubicación está marcada de color naranja, pero en el Festival Internacional Cervantino 2023 y en enero 2024 (figura 7 y 8 respectivamente), está roja, lo que indica que el nivel de concentración aumenta mucho en esa zona.

En contraste con enero, la menor actividad turística y la estabilidad atmosférica resultan en concentraciones más bajas alcanzando hasta  $0.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , aunque las partículas pueden recorrer grandes distancias debido a la geografía de la propia ciudad, además, a esto se le agrega que esta fecha suele ser una etapa de recuperación debido a los grandes gastos económicos que presenta la población al inicio del año.

El patrón constante que existe entre los distintos periodos de las simulaciones es que la concentración de PM 2.5 incrementa en el año del 2024 y este incremento siempre es proporcional en las épocas de mayor turismo en la ciudad. Sin embargo, existen pocos registros o análisis respecto a las emisiones de PM 2.5 de establecimientos locales, los cuales contribuyen cada vez más al deterioro de la calidad del aire de la ciudad de Guanajuato y que son clave para darle seguimiento a la NOM-025-SSA-2014.

Durante eventos como la Semana Santa y el Festival Internacional Cervantino, se observaron aumentos significativos en las concentraciones de PM 2.5, especialmente en áreas con alta actividad turística y consumo de alimentos como pollo y hamburguesas al carbón y a la leña. Estos hallazgos destacan la influencia de eventos estacionales y la afluencia de visitantes en la calidad del aire de la ciudad. Además, la dirección y velocidad del viento juegan un papel crucial en la dispersión de las partículas, afectando la distribución de concentraciones de PM2.5 en distintas zonas de Guanajuato. Estos resultados subrayan la importancia de considerar factores estacionales y actividades locales al analizar la contaminación atmosférica en entornos urbanos.

El análisis promedio de los datos meteorológicos del año del 2023 hasta el 17 de junio del 2024 en la ciudad de Guanajuato se alcanzaron concentraciones de hasta  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

## Referencias.

- Akagi, S. K., Yokelson, R. J., Wiedinmyer, C. M., Alvarado, J., Reid, J. S., Karl, T., Crounse, J. D., & Wennberg, P. O. (2011). Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11, 4039-4072.
- Andreae, M. O. (2019). Emission of trace gases and aerosols from biomass burning - an updated assessment. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 8523-8546.
- Andreae, M. O., & Merlet, P. (2001). Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. *Global Biogeochemical Cycles*, 15, 955-966.
- Bertschi, I. T., Yokelson, R. J., Ward, D. E., Christian, T. J., & Hao, W. M. (2003). Trace gas emissions from the production and use of domestic biofuels in Zambia measured by open-path Fourier transform infrared spectroscopy. *Journal of Geophysical Research*, 108, 8469. DOI: 10.1029/2002JD002158.
- Bhattacharya, S. C., & Abdul Salam, P. (2002). Low greenhouse gas biomass options for cooking in the developing countries. *Biomass and Bioenergy*, 22, 305-317.
- Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope, C. A., et al. (2010). Contaminación del aire por material particulado y enfermedades cardiovasculares: Una actualización de la declaración científica de la Asociación Americana del Corazón. *Circulation*, 121(21), 2331-2378.
- Campo, L., Masiol, M., & Squizzato, S. (2017). Tendencias y variabilidad interanual de material particulado (PM10 y PM2.5) en la región de Veneto (NE Italia). *Contaminación Ambiental*, 220, 168-178.
- Christian, T. J., Yokelson, R. J., Cárdenas, B., Molina, L. T., Engling, G., & Hsu, S. C. (2010). Trace gas and particle emissions from domestic and industrial biofuel use and garbage burning in central Mexico. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10, 565-584.
- Cunuy López, A. F. (2023). Evaluación de la calidad de aire de la emisión de gases producidos por la quema de leña para la producción de carbón, comunidad Pupana norte, cantón Saquisilí (Bachelor's thesis, Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC)).
- DOF. (2014). Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación. *Diario Oficial de la Federación*.
- EPA. (1995). *Compilation of Air Pollutant Emissions Factors*. AP 42, Fifth Edition. Volume 1: Stationary Point and Area Sources. Environmental Protection Agency. Research Triangle Park, NC, USA. <https://www.epa.gov/airemissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors#5thed>.
- EPA. (2016). *Conceptos básicos del material particulado (PM)*. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

- Fernández, A., & Garrido, J. (2013). Evaluación de la exposición a partículas finas en áreas urbanas. *Revista de Ciencias Ambientales*, 29(4), 381-395.
- González, A., Rojas, N. Y., & Guevara, M. (2018). Aplicación del modelo AERMOD para evaluar la dispersión de contaminantes en una zona urbana de Colombia. *Revista Facultad de Ingeniería*, 27(46), 111-119.
- IPCC. (2013). Cambio Climático 2013: La Base de Ciencias Físicas. Contribución del Grupo de Trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático.
- IPCC. (1997). Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Workbook Volume 2. Intergovernmental Panel on Climate Change. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs5.html>. Fecha de consulta: 20 de marzo de 2020.
- OMS. (2013). Revisión de la evidencia sobre los aspectos de salud de la contaminación del aire – Proyecto REVIHAAP. Informe Técnico.
- Padilla-Barrera, Z., Torres-Jardón, R., Ruiz-Suarez, L. G., Castro, T., Peralta, O., Saavedra, M. I., Maser, O., & Molina, L. T., & Zavala, M. (2019). Determination of emission factors for climate forcers and air pollutants from improved wood-burning cookstoves in Mexico. *Energy for Sustainable Development*, 50, 61-68.
- Pope, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Efectos sobre la salud de la contaminación del aire por partículas finas: líneas que conectan. *Revista de la Asociación de Gestión de Residuos y Aire*, 56(6), 709-742.
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2016). *Química y Física Atmosférica: Desde la Contaminación del Aire hasta el Cambio Climático*. John Wiley & Sons.
- Smith, K. R. (1994). Health, energy, and greenhouse-gas impacts of biomass combustion in household stoves. *Energy for Sustainable Development*, 1, 23-29.
- Yokelson, R. J., Christian, T. J., Karl, T. G., & Guenther, A. (2008). The tropical forest and fire emissions experiment: laboratory fire measurements and synthesis of campaign data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8, 3509-3527.
- Zhang, J., Smith, K. R., Ma, Y., Ye, S., Jiang, F., Qi, W., Liu, P., Khalil, M. A. K., Rasmussen, R. A., & Thorneloe, S. A. (2000). Greenhouse gases and other airborne pollutants from household stoves in China: a database for emission factors. *Atmospheric Environment*, 34, 4537-4549.
- Zhang, R., Li, Q., & Zhang, R. (2016). Condiciones meteorológicas para el episodio persistente de niebla y neblina severa sobre el este de China en enero de 2013. *Ciencias de la Tierra*, 59(1), 1-11.