

Modelado de contaminantes atmosféricos de la Central Termoeléctrica en la zona urbana de Salamanca

Ricardo Cruz Yépez¹, Angélica Jazmín Domínguez Gómez², Luis Gabriel Estrada Gámez³, Diana Patricia Martínez Estrada⁴, Mayra Verónica Witrigo Cruz⁵, Amanda Enriqueta Violante Gavira⁶,

^{1,3,4} Ingeniería Mecatrónica, ^{2,3,5} Ingeniería Mecánica

r.cruzyepe@ugto.mx¹, aj.dominguezgomez@ugto.mx², lg.estradagamez@ugto.mx³, dp.martinezestrada@ugto.mx⁴,
mv.witrigocruz@ugto.mx⁵, amanda@correo.mx⁶

Resumen

La generación de electricidad vierte en el aire emisiones de PM₁₀ y SO₂, los cuales provocan diferentes enfermedades respiratorias, cáncer y muertes prematuras. El objetivo de este trabajo es simular la dispersión de estos contaminantes provenientes de la Central Termoeléctrica de Salamanca (CTS) para analizar las concentraciones y el posible daño provocado a la población cuando se sobrepasan los límites permitidos por las normas oficiales. Se estimaron las concentraciones de dichos contaminantes, con el modelo gaussiano, usando datos: ambientales, de diseño de las chimeneas y del modelo matemático. Los hallazgos suponen concentraciones superiores para la chimenea 4, superando las normas (PM₁₀, 75 µg/m³ y SO₂, 288 µg/m³) a una distancia dentro de la zona urbana, lo que afecta la salud poblacional. El modelo gaussiano es una herramienta confiable y de bajo costo, el carácter transversal de este trabajo puede ser útil para estudios epidemiológicos y ambientales.

Palabras clave: dispersión, modelo gaussiano, contaminantes atmosféricos, central termoeléctrica

Introducción

Uno de los grandes retos de la humanidad en el siglo XXI es procurar las mejores condiciones para la salud y la calidad de vida en un ambiente tan deteriorado. Lo que justifica este tipo de estudios, los cuales pueden coadyubar con una mejor gestión de la calidad del aire en ciudades altamente contaminadas. De modo que esta investigación se alinea con la responsabilidad de todas las naciones en cumplir con la Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible, en particular con el objetivo 3, donde específicamente el objetivo particular 3.9 se refiere a tratar de reducir las enfermedades y muertes ocasionadas por la contaminación del aire, agua y suelo La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que incluye 17 objetivos y 169 metas, presenta grandes retos de todos los gobiernos en las dimensiones económicas, social y ambiental. El presente trabajo se relaciona con el objetivo 3: Salud y bienestar el cual está definido como Garantiza una vida sana y promover el bienestar de todos a todas las edades (CEPAL, 2018). La contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental para la salud tanto en los países desarrollados como en los países en desarrollo. Si se lograra disminuir este fenómeno ambiental, con ello se podrían reducir enfermedades cerebrovasculares, cánceres de pulmón y el asma. La contaminación del aire representa un importante riesgo medioambiental para la salud.

La OMS (2021) asegura que, en 2019 el 99% de la población mundial vivía en lugares donde no se respetaban las directrices de la OMS sobre la calidad del aire afectando principalmente a personas de bajos y medianos recursos. De igual forma este organismo señala que el 91% de los 4,2 millones de muertes prematuras por esta causa ocurren en países con economías débiles, en donde no se cuenta con recursos para medir y controlar la calidad del aire y para atender las enfermedades que produce la contaminación ambiental en la población. La literatura reporta que cada vez se cuenta con más evidencias científicas de la relación entre enfermedades respiratorias y muertes prematuras con los contaminantes del aire producto de las actividades antropogénicas principalmente de fuentes fijas como las industrias y las fuentes móviles que consumen combustibles fósiles (SEMARNAT, 2019). El diseño e implementación de estrategias para una adecuada gestión de las emisiones atmosféricas del aire exterior no recae en los ciudadanos, sino en las autoridades municipales, estatales y federales. Esto en coordinación con instancias internacionales, en la elaboración y seguimiento del cumplimiento de las normas que establecen los límites máximos permisibles de las concentraciones de contaminantes, para evitar daños en la salud y en el medio ambiente (OMS, 2021).

Salamanca es uno de los 46 municipios del Estado de Guanajuato. Cuenta con una superficie territorial de 756.54 Km². En 2015, tenía 273, 271 habitantes (INEGI, 2016). En este lugar se localizan empresas de la industria de refinación del petróleo, química, petroquímica, automotriz, termoeléctrica y de alimentos, entre otras. Las mayores fuentes de emisiones contaminantes son la Refinería Antonio M. Amor y la Central Termoeléctrica de Salamanca (CT). Este municipio es uno de los más contaminados del país, debido a la dinámica de la industria petrolera y eléctrica, lo que causa alerta ambiental (ONU, 2016). El incumplimiento de las normas regulatorias del SO₂ y las PM₁₀ provoca la activación de Precontingencias ambientales en municipios industrializados y de considerable movilidad, como el caso de Salamanca, Gto. (Instituto de Ecología del Estado, 2016). El informe nacional de la calidad del aire CEPAL, ONU, SEMARNAT (2017 p. 126) indica que, en Salamanca, el mínimo número de días que se superó algún tipo de norma entre el período 2000-2017 fue 48 y el máximo fue de 175.

Central Termoeléctrica

Una central termoeléctrica es una instalación industrial en donde operan procesos y equipos que se encargan de transformar la energía mecánica en energía eléctrica. El vapor de agua que se obtiene en la caldera es el fluido de trabajo, mismo que a gran presión se hace llegar a las turbinas para que en su expansión, sea capaz de mover los álabes de estas y el rotor del generador para la obtención de la energía eléctrica. El vapor de la caldera se produce al calentar agua con los gases de la combustión de distintos combustibles (Sánchez, 2010). Dicho proceso implica importantes emisiones producto de la combustión de los combustibles fósiles. Existen 3 tipos de Centrales Termoeléctricas de acuerdo con el combustible que ocupen: Centrales Térmicas de carbón (pueden operar con combustóleo), Centrales Térmicas de Fuel y Centrales Térmicas de Ciclo Combinado (gas natural o gasóleo). Siendo las primeras las contaminantes y las últimas las que menor impacto producen (ENDESA, 2018).

La Central Termoeléctrica de Salamanca (CTS) se ubica en la zona oriente, rodeada de una zona principalmente industrial. Abarca una superficie de 40 hectáreas, es una planta de ciclo convencional, comprende 4 unidades, cuya capacidad generadora la coloca en la tercera más importante del país. El tipo de combustible fósil que consume es lo que provoca el exceso de CO₂ y de contaminantes atmosféricos, siendo el más agresivo el combustóleo, lo que incrementa las PM₁₀ y el SO₂ en el aire ambiente. Una de las razones por las que las autoridades han optado por usar este agresivo combustible es su bajo costo, lo cual resulta alarmante porque se deja de lado los grandes impactos negativos que provoca en la salud y el deterioro del medio ambiente. Ver Figura 1.

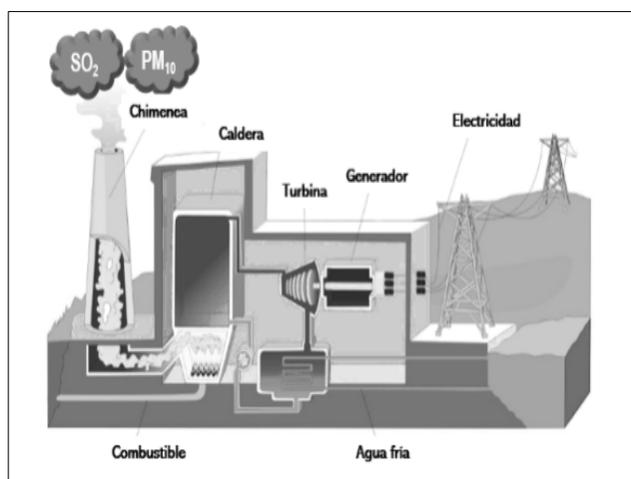


Figura 1 Componentes de una central termoeléctrica.

Las chimeneas industriales son estructuras muy delgadas diseñadas de distintos materiales, su geometría y dimensiones son variables; Su función es eliminar los gases y humos provenientes de los procesos químicos, de combustión, de modo que se garantice la dispersión de los efluentes en la atmósfera tratando de cumplir con la normatividad ambiental (Granados, 2018).

Existen varias normas relacionadas con el diseño y funcionamiento de la central termoeléctrica, así como con el control de sus emisiones. Así la NMX-AA-107-1988, establece que la altura mínima de las chimeneas debe sobrepasar la elevación de la zona de las turbulencias que se forma en los alrededores de la instalación de la chimenea por efectos del viento sobre edificios o montañas y árboles. La misma norma recomienda que el diámetro interior sea tal que regule la velocidad de salida de los gases y se encuentre entre 15 y 25 m/s (SEGOB, 2021). Mientras que dos de las normas relacionadas con las emisiones atmosféricas son la NOM-022- SSA1-2010, que establece los valores límites de la concentración de SO₂ y la NOM-025- SSA1-2014, que regula estos valores para las PM₁₀.

Contaminantes atmosféricos

A sugerencia de la OMS, la gran mayoría de los gobiernos, desde hace décadas se miden y controlan los contaminantes del aire. La calidad y eficiencia de estos procesos implica una fuerte inversión en tecnología y estrategias de gestión, de modo que se pueda contar con información de estado de la calidad del aire las 24 h de los 365 días del año. Los contaminantes más peligrosos para nuestra salud se denominan “contaminantes criterio” y son los siguientes: partículas suspendidas en el aire (PM₁₀, PM_{2.5}), ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂) y monóxido de carbono (CO). Las Normas oficiales Mexicanas de Salud establecen las concentraciones y tiempo de exposición que pueden causar un daño a la salud (Instituto de Ecología del Estado, 2016). Ver tabla 1.

Tabla 1. Valores máximos permitidos OMS y NOMs México.

Contaminante	Valor Guía OMS	NOM mexicana	Valor
SO ₂	20 µg/m ³ en 24 h	NOM-022- SSA1-2010	288 µg/m ³
	500 µg/m ³ en 10 minutos		
PM ₁₀	50 µg/m ³ en 24h	NOM-025- SSA1-2014	75 µg/m ³
	20 µg/m ³ promedio anual		

Dióxido de azufre (SO₂)

El SO₂ es un gas incoloro con un olor penetrante que se genera como resultado de la quema de combustibles fósiles con elevado contenido de azufre que se usan para la calefacción doméstica, la generación de electricidad y los vehículos a motor. Este contaminante tiene efectos en el sistema respiratorio afectando los pulmones y entre otros efectos causa irritación ocular. La inflamación del sistema respiratorio provoca tos, secreción mucosa y agravamiento del asma y la bronquitis crónica. Estudios epidemiológicos señalan que aumenta la propensión a contraer infecciones del sistema respiratorio y cáncer en estos órganos. Combinado con la humedad del aire forma ácido sulfúrico, el componente principal de la lluvia ácida, con afectaciones también a la vegetación (OMS, 2021). La medición de SO₂ se realiza en las estaciones de monitoreo con los analizadores automáticos que reportan resultados en tiempo real. Aprovechan las propiedades físicas y/o químicas de un contaminante gaseoso para determinar su concentración. Particularmente, usan el principio de fluorescencia pulsante, a partir del hecho de que las moléculas de SO₂ tienen facilidad para absorber la radiación ultravioleta (UV) a determinada longitud de onda (210-410 nm), cuando pasan de un estado de máxima energía a uno de mínima energía, emiten un pulso de luz fluorescente de una longitud de onda mayor (240 a 410 nm), la intensidad de la luz fluorescente emitida es proporcional a la concentración de SO₂ (INECC, 2018).

Material particulado (PM₁₀)

Consiste en una compleja mezcla de partículas sólidas y líquidas de sustancias orgánicas e inorgánicas suspendidas en el aire, se considera que tienen un diámetro aerodinámico de 10 micras. Resultan dañinas en nuestro organismo porque pueden penetrar y alojarse profundamente en los pulmones. Los principales componentes de la materia particulada son: compuestos orgánicos volátiles, sulfatos, nitratos, amoníaco y metales pesados entre otros, La literatura reporta que existe una estrecha correlación cuantitativa entre la exposición a altas concentraciones de materia particulada y el aumento de la mortalidad o morbilidad diaria y a largo plazo. Es considerado el contaminante potencial riesgo a la salud (Instituto de Ecología del Estado, 2016).

Dispersión de contaminantes

La dispersión es un proceso por el que se realiza la difusión de los contaminantes atmosféricos provenientes de la actividad industrial y del transporte. Su dinámica se asocia con diversos factores. La columna o nube de emisión de contaminantes de las chimeneas industriales es conocida como pluma o penacho (Pereira, 2018). Está en función de las condiciones topográficas (espacio) de la fuente de emisión y del tiempo (Wang y Hsu, 2018). Depende de condiciones ambientales como la temperatura, radiación solar, humedad relativa, velocidad y dirección del viento entre otros. También depende de factores de diseño de las chimeneas que los emiten y de parámetros tales como el caudal, la velocidad y temperatura de los gases efluentes (Trosic y Filipic., 2017). El estudio de la calidad del aire incluye los modelos de dispersión atmosférica son una herramienta importante para la gestión de la calidad del aire, la simulación incluye los conocimientos más recientes sobre dinámica atmosférica para estimar los patrones de disipación, reacciones químicas y remoción de dichos contaminantes (Kelly, et al., 2019). La simulación numérica de dicho fenómeno modela los procesos de dispersión y transporte partiendo de datos de las fuentes emisoras. Mientras que existen otros enfoques que emplean técnicas avanzadas como metodologías de aprendizaje automático de distintas zonas urbanas (Alimissis y Deligiorgi, 2018).

En este contexto, el objetivo de este estudio es realizar la simulación de la dispersión del SO₂ y las PM₁₀ provenientes del CTS en Salamanca, Gto. para analizar cuáles son las concentraciones presentes en el área urbana y con ello conocer el riesgo de la población, cuando se sobrepasan los límites máximos permitidos por las normas oficiales.

Materiales y métodos

Se realizó el modelado de las concentraciones de PM₁₀ y SO₂ en el aire ambiente para la ciudad de Salamanca, enfocando las emisiones de la CTS. Para ello se plantearon seis escenarios que incluyeron distintos coeficientes de estabilidad atmosférica, por ser muy relevante esta condición para la dispersión de los contaminantes. Además, se consideraron distintos horarios, intensidad de radiación solar y velocidad del viento. Salamanca, Gto. se ubica a 20° 34 13" de latitud norte y 101° 11 50" de longitud oeste, a una altitud de 1, 721 msnm (INEGI, 2017). La Central Termoeléctrica de Salamanca se ubica en la zona oriente, rodeada de varias industrias. Abarca una superficie de 40 hectáreas, se localiza aproximadamente a 1,5 km de la cabecera municipal de Salamanca, Guanajuato con domicilio Prolongación Av. Faja de Oro S/N, Col. Salamanca, C.P. 36700 Salamanca.

El modelo gaussiano

El fundamento del modelo se basa en el flujo de materia que fluye por unidad de área y por unidad de tiempo, por lo que aplica la primera ley de Fick para difusión molecular. Ver Ecuación 1.

$$J = -K \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

Donde:

J = Flujo másico del contaminante (ML⁻²T⁻¹).

K = Coeficiente de difusión.

∂C = Variación de concentración del contaminante (MT^{-1}).

∂x = Variación de distancia (L).

Cuando las emisiones provienen de una fuente puntual las soluciones de la ecuación anterior, pueden considerarse en una dos o tres dimensiones. Con ello es posible obtener la masa de un contaminante mediante ecuaciones gaussianas. El caso más común de las ecuaciones gaussianas es el de dos dimensiones cuando se trata del vertido de una chimenea industrial. Ver Ecuación 2.

$$c(x, y, t) = \frac{Q}{4\pi u(K_x K_y)^{\frac{1}{2}}} e^{\left[-\frac{1}{4t}\left[\frac{x^2}{K_x} + \frac{y^2}{K_y}\right]\right]} \quad (2)$$

Donde:

K_x , K_y y K_z = Funciones de la posición.

x = Transporte de contaminante en la dirección x .

y = Transporte de contaminante en la coordenada transversal y .

z = Transporte del contaminante en la coordenada vertical z .

Incluyendo otras variables se tiene la Ecuación 3.

$$c = \frac{Q}{4\pi ut(K_x K_y)^{\frac{1}{2}}} e^{\left[-\frac{1}{4t}\left[\frac{y^2}{K_y} + \frac{(z-H)^2}{K_z}\right]\right]} \quad (3)$$

Donde:

Q = Tasa de emisión del contaminante gaseoso (g/s).

H = Altura efectiva de la emisión (m).

Las constantes K_y y K_z se sustituyen en la ecuación por los coeficientes de dispersión σ_y y σ_z , las cuales, matemáticamente corresponden a las desviaciones estándar, por lo que tienen unidades de longitud. Para una difusión turbulenta, que es caso que aplica a este estudio, se consideran las siguientes relaciones, con lo que se obtiene la Ecuación 4:

$$\sigma_y = \sqrt{2K_y \frac{x}{U}} ; \sigma_z = \sqrt{2K_z \frac{x}{U}} \quad (4)$$

Donde:

x = Distancia (m).

U = Velocidad media del viento (m/s).

Por lo que la modificación implica la obtención de la Ecuación 5.

$$c(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} e^{\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right]} \quad (5)$$

Finalmente, la Ecuación 6 representa la concentración del contaminante a nivel del suelo ($x = 0$, $y = 0$) que es la que se empleó en el modelado.

$$c(x, 0, 0, H) = \frac{Q}{2\pi U \sigma_y \sigma_z} e^{\left[-\frac{H^2}{2\sigma_z^2}\right]} \quad (6)$$

Se requiere conocer la altura efectiva de las chimeneas (H) lo que se hace con la ecuación 7:

$$H = h + \Delta h \quad (7)$$

Donde:

h = Altura de la chimenea

Δh = Altura del penacho

La altura del penacho está en función de factores ambientales como la temperatura, la presión y la velocidad del viento y se calcula con la Ecuación 8:

$$\Delta h = \frac{D V_s}{u_z} \left(1.5 + 2.68 \times 10^{-3} P D \frac{T_s - T_a}{T_s} \right) \quad (8)$$

Donde:

D = Diámetro de la chimenea (m).

T_s = Temperatura de salida del contaminante (K)

T_a = Temperatura atmosférica (K).

V_s = Velocidad de salida del contaminante (m/s).

P = Presión atmosférica en (mbar).

La elevación del penacho se corrige usando datos de la categoría de estabilidad atmosférica como se indica en la Tabla 2.

Tabla 2. Factores de corrección de la elevación del penacho.

Categoría de estabilidad atmosférica	Factor de corrección
A	1.15
B	1.15
C	1.1
D	1
E	0.85
F	0.85

En alturas menores a 10 metros, el rozamiento afecta la velocidad del viento, lo que implica realizar una corrección con la Ecuación 9 :

$$U_z = U_{10} \left(\frac{h}{10} \right)^p \quad (9)$$

Donde:

U_z = Velocidad del viento a la altura de la fuente emisora (m/s).

U₁₀ = Velocidad del viento a la altura de 10 m (m/s).

h = Altura de la fuente emisora (m).

p = Coeficiente exponencial atmosférico para medio urbano o rural según la categoría de estabilidad. Ver tabla 3.

Tabla 3. Factores de corrección de la velocidad del viento.

CEA	Coeficiente p	
	Urbano	Rural
A	0.15	0.07
B	0.15	0.07
C	0.2	0.1
D	0.25	0.15
E	0.3	0.35
F	0.3	0.35

Para obtener las desviaciones estándar se aplican las CEA como se indica en la Tabla 4:

Tabla 4. Desviaciones estándar para los ejes y y z.

Σy	σz	Categoría de estabilidad atmosférica
$0.22x (1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.20 x$	A
$0.16x (1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.12x$	B
$0.11x (1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.08x (1 + 0.0002x)^{-1/2}$	C
$0.08x (1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.06x (1 + 0.0015x)^{-1/2}$	D
$0.06x (1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.03x (1 + 0.003x)^{-1}$	E
$0.04x (1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.016x (1 + 0.0003x)^{-1}$	F

Varios parámetros del modelado implican establecer el tipo de categoría de estabilidad atmosférica, por lo que se establece en función de la Tabla 5.

Tabla 5. Categorías de dispersión de Pasquill-Gifford-Turner.

V z (m/s)	Día			Noche	
	Fuerte	Media	Baja	Nubes ligeras	Sin nubes
2	A	A-B	B		
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
6	C	D	D	D	D

Datos del modelado

Los datos ambientales de los registros de los valores históricos de la estación Cruz Roja para las variables ambientales (temperatura y presión atmosférica, velocidad y dirección del viento)¹. También se obtuvieron las concentraciones de dicha estación, para las PM₁₀ y el SO₂ del año 2021, esta información se aplicó en la evaluación del modelo. También se requirió de datos referentes al diseño y emisiones de las chimeneas del CTS². Para realizar el modelado se establecieron los escenarios que se indican en la Tabla 6:

Tabla 6. Escenarios del modelado.

Escenario	CEA	Horario	Va (m/s)	Ta (°C)
1	A	día	2.8	
2	B	día	2.8	
3	C	día	2.8	T ₁
4	C	día	2.8	
5	D	día	9	
6	D	noche	9	T ₂

La solución del modelo implica las siguientes consideraciones:

- Se supone que el transporte de contaminantes es línea recta de manera instantánea en la dirección del viento.
- La chimenea es una fuente puntual de emisión.
- La difusión de los contaminantes es pasiva.
- El terreno de donde proviene la pluma es plano.

¹ Datos reportados en el sitio oficial de la Secretaría de Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial de Guanajuato. (SMAOT 2020).

² Datos técnicos de un estudio previo (CEPAL, et al., 2004).

- e. Los flujos turbulentos se relacionan con los gradientes de las concentraciones promedio.
- f. La difusión es pasiva.
- g. La difusión longitudinal y la molecular pueden despreciarse.
- h. Tanto la velocidad del viento lateral como vertical se consideran nulas.

De manera sintética se presentan en la Tabla 7, los parámetros del modelado:

Tabla 7. Parámetros del modelado.

Datos técnicos de las chimeneas		Datos Ambientales		Datos del modelo	
Q	Tasa de emisión (g/s)	U	Velocidad del viento (m/s)	H	Altura efectiva (m)
D	Diámetro de la chimenea (m)	Ta	Temperatura atmosférica (K)	oy	Coefficiente de dispersión en eje y
h	Altura de la chimenea (m)	P	Presión atmosférica (mbar)	oz	Coefficiente de dispersión en eje z
Ts	Temperatura de salida (K)				
Vs	Velocidad de salida (m/s)				

El manejo de información de los registros de la estación Cruz Roja se realizó mediante la elaboración de una base de datos de concentración de los contaminantes y de las condiciones meteorológicas para 2021, con la aplicación de la herramienta tablas dinámicas del software Excel. La rosa de vientos para la determinación de la dirección media de los vientos dominantes se obtuvo aplicando el software WRPLOT View.

En la Tabla 8 se presentan los datos técnicos de las chimeneas, en la Tabla 9 se indican los valores medios de las concentraciones de contaminantes 24 h así como los valores medios de las variables meteorológicas. Mientras que las Tablas: 10 y 11, indican los promedios de los parámetros ambientales y las concentraciones de los dos contaminantes respectivos al día y la noche.

Tabla 8. Datos técnicos de diseño de las chimeneas.

Chimenea	Q PM ₁₀ (m/s)	Q SO ₂ (m/s)	Ts (K)	Vs (m/s)	D (m)	h (m)	Vs (m/s)
1	47.7	745	438.5	22.8	4.5	64.6	22.8
2 y 3	41.4	647.3	432.1	29.1	3.9	51.2	29.1
4	54.5	849.4	409.5	13.6	5.1	25.9	13.6

Tabla 9. Valores promedio 24 h de concentraciones de contaminantes y variables ambientales.

Mes	Valores promedio 24 h					
	PM ₁₀ [µg/m ³]	SO ₂ [ppm]	T (°C)	PBAR (mmHg)	WS (m/s)	WD (Grados)
Ene	51.13	0.02	18.33	624.01	1.90	181.07
Feb	50.67	0.03	44.92	622.57	2.26	190.09
Marzo	52.17	0.03	22.91	621.52	2.49	188.01
Abril	50.52	0.02	24.38	618.99	2.59	198.57
Mayo	35.73	0.02	24.32	621.88	2.91	159.05
Junio	22.51	0.01	21.79	623.14	2.37	139.11
Julio	26.65	0.01	21.87	624.77	1.85	145.45
Agosto	22.80	0.02	21.67	623.25	2.20	141.24
Septiembre	21.20	0.02	21.21	623.88	2.06	134.37
Octubre	25.23	0.03	21.31	623.78	2.08	138.99
Noviembre	33.40	0.03	18.90	625.16	2.24	120.44
Diciembre	56.23	0.01	18.56	624.68	1.21	166.60

Tabla 10. Valores promedio periodo día de concentraciones de contaminantes y variables ambientales.

Valores promedio día						
Mes	PM ₁₀ [µg/m ³]	SO ₂ [ppm]	T (°C)	PBAR (mmHg)	WS (m/s)	WD (Grados)
Ene	43.09	0.02	20.87	624.18	2.35	181.53
Feb	42.54	0.03	38.32	622.78	2.81	194.49
Marzo	47.97	0.03	25.41	621.75	2.66	196.99
Abril	43.3	0.02	27.13	619.02	2.79	210.11
Mayo	35.57	0.02	27.1	621.82	2.96	181.82
Junio	25.41	0.01	24.37	622.96	2.73	143.2
Julio	28.37	0.01	24.37	624.74	2.25	141.56
Agosto	23.5	0.02	24.4	623.09	2.7	131.71
Septiembre	20.35	0.02	23.9	623.72	2.26	137.75
Octubre	21.76	0.02	24.04	623.71	2.38	141.43
Noviembre	28.21	0.02	22.18	625.08	2.3	132.32
Diciembre	42.98	0.01	21.78	624.79	1.5	172.65

Tabla 11. Valores promedio periodo noche de concentraciones de contaminantes y variables ambientales.

Valores promedio noche						
Mes	PM ₁₀ [µg/m ³]	SO ₂ [ppm]	T (°C)	PBAR (mmHg)	WS (m/s)	WD (Grados)
Ene	55.96	0.02	16.8	623.91	1.64	180.79
Feb	55.43	0.03	48.79	622.45	1.94	187.54
Marzo	54.7	0.04	21.41	621.39	2.39	182.62
Abril	54.86	0.02	22.73	618.98	2.47	191.62
Mayo	35.82	0.02	22.7	621.92	2.88	145.72
Junio	20.74	0.01	20.24	623.25	2.15	136.65
Julio	25.64	0.01	20.36	624.78	1.61	147.79
Agosto	22.38	0.02	20.02	623.35	1.91	146.96
Septiembre	21.71	0.02	19.59	623.97	1.95	132.34
Octubre	27.31	0.03	19.68	623.82	1.9	137.54
Noviembre	36.51	0.03	16.94	625.21	2.2	113.31
Diciembre	64.14	0.01	16.65	624.62	1.05	163

Resultados y discusión

A continuación, se muestran los resultados del análisis de la información de los registros automáticos de la estación Cruz Roja. Las condiciones meteorológicas promedio mensual de la temperatura y la presión barométrica para la ciudad de Salamanca. De las cuales se aprecia que la variación de temperatura no es extrema a lo largo del año, con el mayor registro en el verano. Por su parte la presión barométrica tampoco presenta amplio rango de variación. Ver Figura 2. Por otra parte, en la Figura 3 se aprecia que los vientos predominantes fueron en la dirección Este y Suroeste.

En la Figura 4 se observa el comportamiento promedio mensual de la concentración de las PM₁₀. Nótese que en la temporada de invierno es cuando mayores registros se tienen de partículas y en la Figura 5 el correspondiente al SO₂, en este caso los mayores valores se presentan en la temporada cálida.

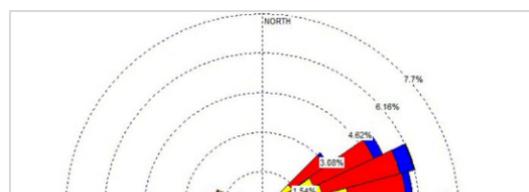


Figura 2. Promedios mensuales de temperatura y presión.

Figura 3. Velocidad y dirección del viento.

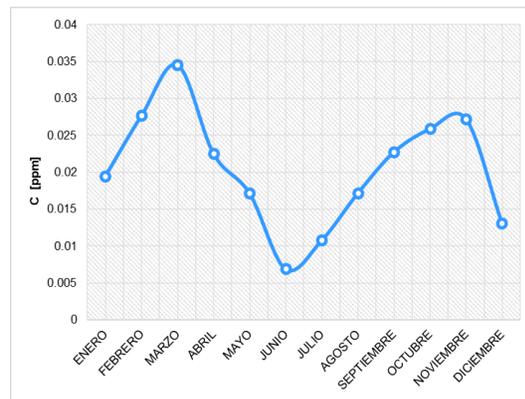
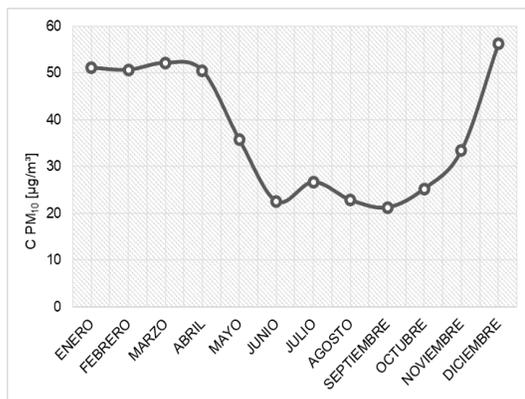


Figura 4. Concentración promedio mensual de PM₁₀.

Figura 5. Concentración promedio mensual de SO₂.

El modelado de las concentraciones de contaminantes

Se muestran los resultados del modelado con la aplicación del modelo gaussiano para la obtención del perfil de concentraciones de ambos contaminantes provenientes de las 4 chimeneas de la Central Termoeléctrica de Salamanca (partiendo desde la base de dichas chimeneas), respecto a la distancia horizontal, la cual es coincidente con la dirección del viento y con la mancha urbana, lo anterior, para los 6 escenarios planteados.

En las gráficas que se representan en las estas últimas figuras, con color rosa se representan las emisiones de la chimenea 1, con verde las correspondientes a las chimeneas 2 y 3 (que tienen las mismas dimensiones), mientras que con azul se indican las emisiones de la chimenea 4.

En Tabla 12 se indican las concentraciones de ambos contaminantes: máxima y promedio, así como la correspondiente distancia en la dirección del viento para estos valores. También se indica la concentración a los 3000 m (medidos desde las chimeneas) que es donde se ubica la estación Cruz Roja.

Para las partículas PM₁₀

En el escenario 1, es posible observar que la chimenea 4 presenta mayor concentración de este contaminante a 500 m de distancia, superando los niveles de concentración que emiten las chimeneas 1, 2 y 3, y a su vez el nivel de concentración referente a la norma. En el escenario 2, se puede notar nuevamente que la chimenea 4 predomina sobre las demás chimeneas en dispersar una mayor concentración del contaminante sobrepasando ligeramente el nivel de concentración de la norma, en el escenario 3 es posible notar que la mayor concentración de las partículas PM₁₀ que dispersa la chimenea 4 entre los 1300 y 1400 m de distancia se encuentra muy cercana al nivel de concentración de la norma, cuyo valor corresponde a los 75 µg/m³. Por otro lado, en el escenario 4 se puede percibir que la máxima concentración de PM₁₀ que esparce la chimenea 4 sobrepasa el valor de concentración de la norma, esto a los 600 m de distancia, de las gráficas correspondientes a los escenarios 5 y 6. Es posible observar que ambas presentan el mismo comportamiento, para la chimenea 4, se superan los valores de concentración vertidos por las otras chimeneas. La máxima concentración se encuentra entre los 900 y 1000 m de distancia, superando además el valor de concentración de la norma, así mismo cabe resaltar que para estos últimos dos escenarios no influye la categoría de estabilidad ambiental planteada en cada uno. Ver Figura 6.

Para el dióxido de azufre (SO₂)

En el escenario 1, se logra notar que la chimenea 4 presenta una mayor concentración en la dispersión de SO₂, excediendo el valor correspondiente a la norma, con una concentración máxima a los 500 m de distancia de donde se sitúa dicha chimenea, además se puede notar que las chimeneas 1, 2 y 3 también superan el valor de concentración de la norma (288 µg/m³). En los escenarios 2, 3 y 4 al igual que en el escenario 1, la chimenea 4 es la que muestra una mayor concentración de SO₂ cuando se dispersan los gases expulsados, esto, para el escenario 2 a una distancia de 900 m. Esto ocurre para el escenario 3, a una distancia de 1400 m y para el escenario 4 a una distancia de 600 m, excediendo el valor límite de concentración de la norma. Para estos mismos escenarios, la concentración máxima de las chimeneas 1, 2 y 3, se sobrepasa también el valor establecido por la norma. En los escenarios 5 y 6, cabe resaltar que la categoría de estabilidad ambiental no afecta en los valores de concentración arrojados, por lo que ambos escenarios presentan el mismo comportamiento, de estas gráficas se logra apreciar que la chimenea 1 es la única que presenta una máxima concentración de SO₂ que se encuentra por debajo del valor de concentración establecido por la norma. La chimenea 4 muestra una máxima concentración a los 1000 m de distancia superando en mayor medida el valor de concentración de la norma, mientras que las chimeneas 2 y 3 exceden ligeramente los 288 µg/m³. Ver Figura 7.

Tabla 12. Concentraciones de PM₁₀ y de SO₂ estimadas con el modelo gaussiano.

E	Chimenea	SO ₂ (µg/m ³)				PM ₁₀ (µg/m ³)			
		C max	C prom	C _{3000 m}	x(m)	C max	C Prom	C _{3000 m}	x(m)
1	1	457	185.8221	99	800-900	29	11.8976	6	800-900
2	1	389	143.0396	197	1400	25	9.1584	13	1300-1500
3	1	342	105.1955	325	2000	22	6.7353	21	2000
4	1	436	184.7061	167	1100	28	11.8261	11	1000-1200
5	1	247	95.8827	243	2000	16	6.1391	16	2000-3000
6	1	247	95.8827	243	2000	16	6.1391	16	2000-3000
1	2 y 3	455	181.7314	88	800	29	11.6232	6	800
2	2 y 3	384	145.2969	178	1300	25	9.2929	11	1300
3	2 y 3	350	109.2651	311	2000	22	6.9884	20	2000
4	2 y 3	496	211.8872	154	1000	32	13.5519	10	900-1000
5	2 y 3	314	128.9486	269	2000	20	8.2473	17	2000
6	2 y 3	314	128.9486	269	2000	20	8.2473	17	2000
1	4	1432	488.1504	126	500	92	31.3212	8	500
2	4	1203	488.6084	274	900	77	31.3505	18	900
3	4	1158	465.2419	613	1400	74	29.8513	39	1300-1400
4	4	1908	705.4715	236	600	122	45.2651	15	600
5	4	1502	716.3970	616	1000	96	45.9661	40	900-1000
6	4	1502	716.3970	616	1000	96	45.9661	40	900-1000

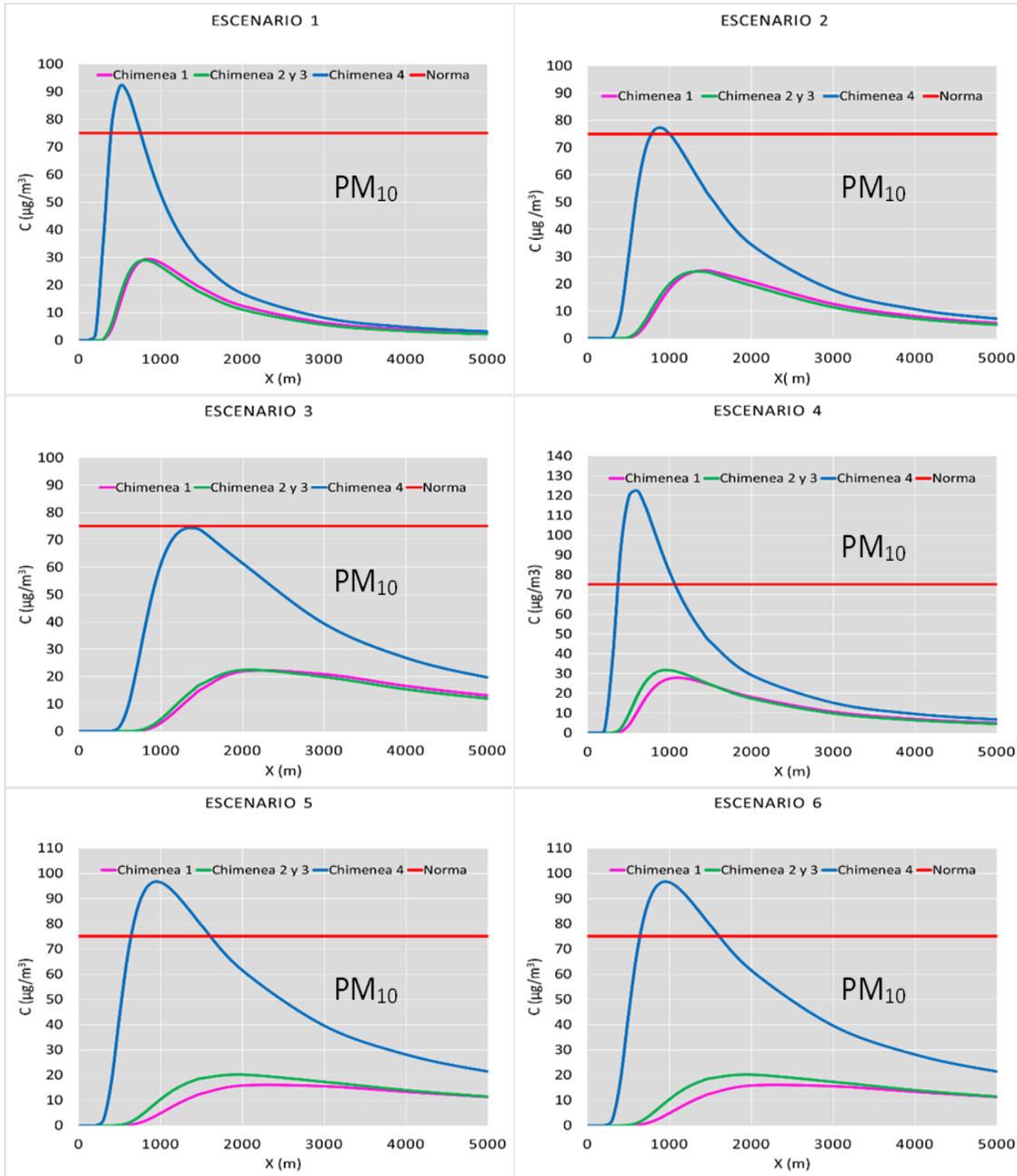


Figura 6. Perfil de concentraciones estimadas para las PM₁₀.

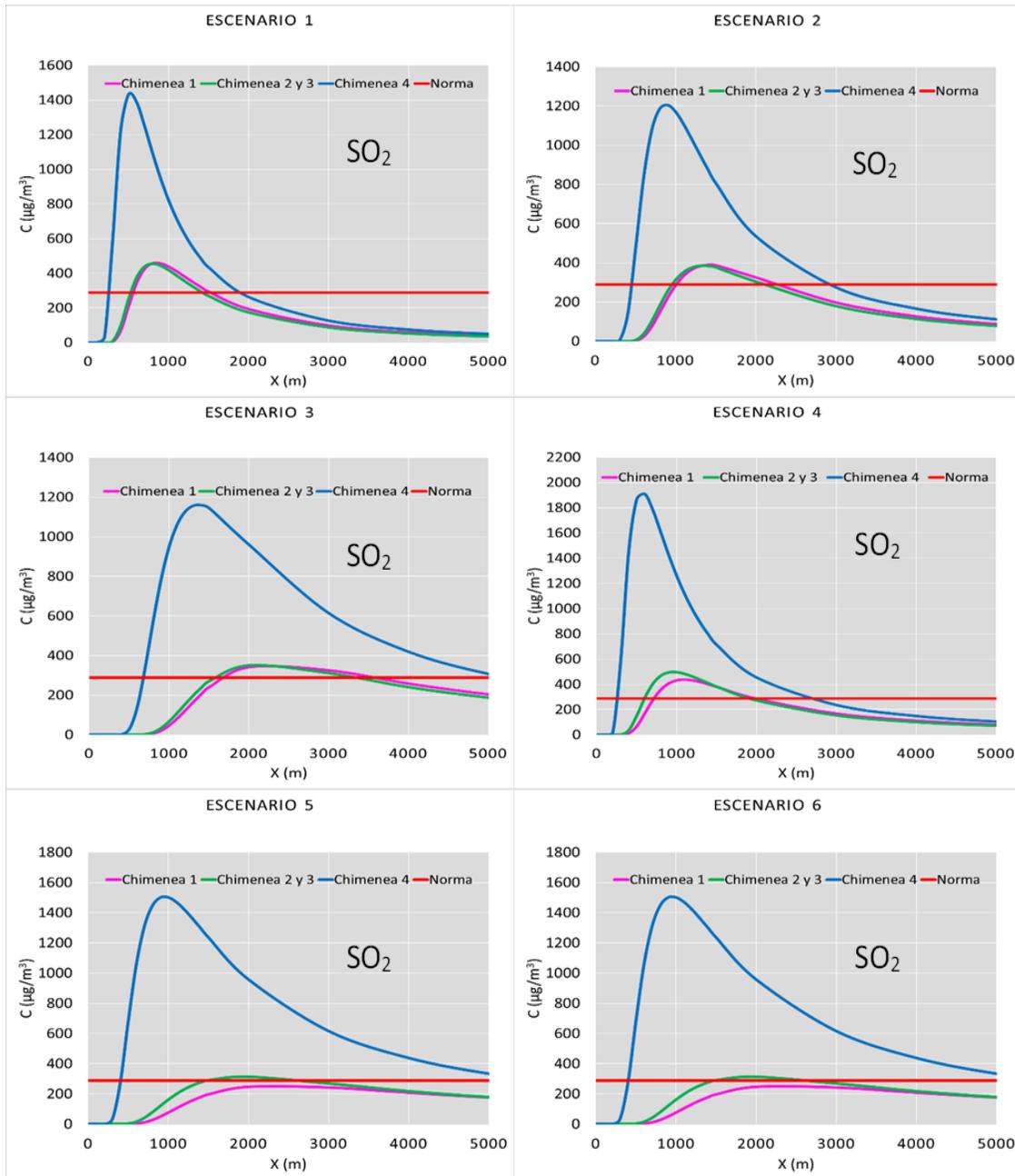


Figura 7. Perfil de concentraciones estimadas para el SO₂.

Conclusiones

La solución matemática del modelo gaussiano para obtener el perfil de concentraciones de PM₁₀, SO₂ o cualquier otro contaminante con relación a la dirección del viento, desde la fuente de emisión es una herramienta propuesta por la EPA, que resulta confiable y de bajo costo.

El conocimiento de la dispersión de los contaminantes del aire en función de datos: técnicos, ambientales, geoespaciales e información del modelo gaussiano, puede apoyar la gestión de la calidad del aire, así como en la ubicación o reubicación de estaciones de monitoreo atmosférico y la migración del uso de combustibles fósiles por combustibles amigables con el medio ambiente. El carácter transversal de este trabajo puede ser de beneficio para estudios epidemiológicos, meteorológicos y de dinámica de fluidos entre otros. Los hallazgos suponen que las concentraciones de ambos contaminantes, para los distintos escenarios planteados, son superiores para las emisiones de la chimenea 4 cuya altura es la menor de las cuatro, lo que ocurre a una distancia que representa un potencial riesgo para la población. En el caso del SO₂, éste se vierte en el aire a una distancia que está dentro de la mancha urbana poniendo en riesgo a las personas que viven o trabajan en este sitio, debido a las características propias de este agresivo compuesto y por las reacciones que genera al ingresar a nuestro organismo.

Referencias bibliográficas

- Alimissis, A. P. y Deligiorgi, D. (2018). Spatial estimation of urban air pollution with the use of artificial neural network models Atmospheric Environment, 19(1), 205-213.
- Amable, I., Méndez, J., Bello, B., Benítez, B., Escobar, L., Zamora, R. (2017). Influencia de los contaminantes atmosféricos sobre la salud. Revista Médica Electrónica.
- Borrego, C., Ginja, J., Cuotinho, M., Ribeiro, C., Karatzas, K., y T, S. (2018). Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir Joint Exercise – Part II. Atmospheric Environment. 193.
- CEMDA. (2016). Los derechos humanos y la calidad de aire en México, CDMX: Hewlett Foundation.
- CEPAL. (2018). Naciones Unidas. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>.
- CEPAL, ONU y SEMARNAT. (2004). Evaluación de las externalidades ambientales de la generación termoeléctrica en México. Cd. de México: SEMARNAT.
- CFE. (2020). Manifestación de Impacto Ambiental proyecto CT Salamanca. Obtenido de <https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgiraDocs/documentos/gto/estudios/2019/11GU2019E0072.pdf>.
- Cruz-López, C. A. (2015). Implementación de un modelo de dispersión atmosférica y cálculo de la dosis en la liberación de efluentes radiactivos en el centro nuclear. tesis. Cd. de México, México: IPN.
- ENDESA. (2018). Central térmica convencional. Obtenido de ENDESA EDUCA: <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/centrales-electricas-convencionales/central-termica-convencional>
- Etchie, T., Etchie, A., Adewuyi, G. O., Pillariseti, A., Sivanesan, S., y Krishnamurthi, K. y. (2018). The gains in life expectancy by ambient PM_{2.5} pollution reductions in localities in Nigeria. Environmental Pollution 236.
- Foro de la Industria Nuclear Española. (13 de mayo de 2020). Foro Nuclear. Recuperado el 03 de Julio de 2022, de <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-distintas-fuentes-de-energia/que-es-una-central-termoelectrica/>
- Gibson, M., y Kundu, S. y. (2013). Dispersion model evaluation of PM_{2.5}, NO_x and SO₂. Atmospheric Pollution Research.

- González-Cruz, M. B., Pire-Rivas, S. y López-Jiménez, P. A. (2012). Sensibilidad del Modelo ISCST3 en la estimación de contaminantes conservativos. *Revista de Ingeniería Química* 11(2), 287-298.
- Google Earth. (2020). Localización de Salamanca, Gto. . . : Obtenido de <https://earth.google.com/web/@20.56991452,101.17962351,1711.86259827a,3811.42382427d,35y,0h,0t,0r>
- Granados, A. S. (2018). *Avances en el Análisis y Diseño de Chimeneas Industriales*. Cd. de México, México: UNAM.
- INECC. (2018). *Informe Nacional de Calidad del Aire 2017*, México. Cd. de México: INECC: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos.
- SEMARNAT-SINAICA-INECC. (20 de junio de 2018c). *Manuales de la calidad del aire*. Obtenido de Manual 3: <http://sinaica.inecc.gob.mx/pags/guias.php>. INECC. (2022). *Medio Ambiente*. Obtenido de *Manuales de monitoreo atmosférico*: <https://sinaica.inecc.gob.mx/pags/guias.php>
- INEGI. (2016). *Anuario Estadístico y Geográfico de Guanajuato 2016*. Guanajuato: INEGI.
- INEGI. (2018). *México en cifras*. Obtenido de Guanajuato 11: <https://www.inegi.org.mx/app/areasgeograficas/?ag=11>.
- Instituto de Ecología del Estado. (2016). *Informe de estado y Tendencia*. Guanajuato: IEE.
- Instituto para la Salud Geo ambiental. (2020). *El dióxido de azufre*. Obtenido de https://www.saludgeoambiental.org/dioxido-azufre-so2?gclid=Cj0KCQiA8dH-BRD_ARIsAC24umaweBsQ3109-VP_QODT9EtDklh9gYOPGgpeacfzs2N-PT8exkUjC8MaAjXIEALw_wcB.
- Kelly, J., Jang, C. J., Timin, B., Gantt, B., Reff, A., Zhu, Y., . . . Hanna, A. (2019). A system for developing and projecting PM2.5 spatial fields to correspond to just meeting national ambient air quality standards. *Atmospheric Environment*, X(2), 100019.
- OMS. (22 de septiembre de 2021). *Contaminación del aire ambiente (exterior)*. Recuperado el 05 de Julio de 2022, de [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- ONU HABITAT. (5 de agosto de 2016). Obtenido de <http://infonavit.janium.com/janium/Documentos/57878.pdf>. Pereira, D. (2018). Simulación de la dispersión de contaminantes en la atmósfera de una planta de generación de electricidad a biomasa. *Acta Nova*, 8(3), 376-396.
- SEGOB. (04 de junio de 2021). *Comisión Reguladora de Energía*. Obtenido de *Diario Oficial de la Federación*: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5620390&fecha=04/06/2021#gsc.tab=0.
- SEMARNAT. (19 de septiembre de 2019). *Atmósfera. Calidad del aire*. Obtenido de https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_resumen14/05_atmosfera/5_1_2.html. Trosic,
- Trosic, y Filipcic. (2017). Multiple Linear Regression (MLR) model simulation of hourly PM10 concentrations during sea breeze events in the Split area. *Nase More*, 64(3), 77-85.
- Wang, C., y Hsu, C. (2018). How Critical is geométrica confinement? Analysis of spatially and temporally resolved particulate matter reoval with and electrostatic precipitator. *RSC Advences*, 8, 30925-30931.