

Contribución del sector ladrillero a la contaminación atmosférica empleando el modelo gaussiano y su impacto a la salud de la población: caso de estudio de las ladrilleras del Refugio en la ciudad de León, Guanajuato

Aguilera Pizano, Andrea Michelle¹, Cruz Aguilar, Montserrat¹, Hernández Bustos, Diana Ailed¹, Ojeda Paredes, Anette Paulina¹, Ramírez Rangel, Juliette Fernanda², Villalpando Vargas, Omar¹, Zapien Gómez, Jovana¹, Vázquez Núñez, Édgar¹

¹Departamento de Ingenierías Química, Electrónica y Biomédica; División de Ciencias e Ingenierías, Campus León, Universidad de Guanajuato | Dirección de correo electrónico: am.aguilera@ugto.mx; m.cruzaguilar@ugto.mx; da.hernandezbustos@ugto.mx; ap.ojedaparedes@ugto.mx; o.villalpandovargas@ugto.mx; j.zapiengomez@ugto.mx; edgar.vazquez@ugto.mx

²Bachillerato Bivalente, Escuela de Nivel Medio Superior Centro Histórico León, Universidad de Guanajuato | Dirección de correo electrónico: jf.ramirez.rangel@ugto.mx

Resumen

El motivo para hacer esta investigación radica en la necesidad de entender una de las grandes problemáticas ambientales que afectan al estado de Guanajuato desde uno de los sectores con mayor impacto, es decir, la contaminación atmosférica producida por los hornos ladrilleros. El estudio comprende el análisis teórico de la emisión de contaminantes de una fuente fija en la zona del Refugio en la ciudad de León, Guanajuato, usando el modelo gaussiano para la dispersión de las emisiones generadas por los hornos Ladrilleros y así poder determinar las concentraciones del contaminante en un radio de 50km, teniendo como apoyo datos con los históricos meteorológicos de la ciudad, así como datos generales del funcionamiento de los hornos ladrilleros. El trabajo realizado presenta resultados para el año 2020, donde se puede apreciar la relación que tienen 3 grupos de meses con los valores de las dispersiones, el factor que determinó este comportamiento fue la estabilidad atmosférica, afectando en mayor grado la velocidad del viento; para determinar las regiones afectadas fu indispensable emplear la dirección del viento, de manera que se pudieron identificar las comunidades directamente afectadas. Con los resultados obtenidos es posible estimar cuáles podrían ser las patologías presentadas a causa de las emisiones generadas por el sector ladrillero en Del Refugio.

Palabras clave: Contaminación atmosférica, emisiones, estabilidad atmosférica, modelo gaussiano, patología.

Abstract

The reason for this research lies in the need to understand one of the greatest environmental problems that affects the state of Guanajuato, the atmospheric pollution produced by the manufacturing of bricks sector. The work carried out an analysis taking as a fixed source the Refuge area in the city of León, Guanajuato, the Gaussian model was used to estimate the dispersion of the pollutants emitted for the above-mentioned sector and to determine the pollutants' concentration at a radius of 50km. The data were collected from historical data websites.; the study was performed considering the information for 2020.

It was found that the pollutants dispersion was similar among the months evaluated, being grouped in 3 clusters. The factor that determined this behavior was atmospheric stability, affecting the wind speed to a greater extent. To determine the affected region, it was considered the wind direction, so it was possible to conclude which communities might be directly exposed.

Finally, it was possible to obtain information to be used for diagnosis of air pollution reasons and estimate the possible impact on human health.

Introducción

La contaminación atmosférica indica la presencia de materias o formas de energía en el aire en cantidades que pueden ser perjudiciales para la salud de las personas, afectar bienes de cualquier naturaleza y ocasionar cambios en las condiciones meteorológicas o climáticas. En las últimas décadas, la industrialización se ha ampliado considerablemente, ocasionando a su vez el aumento en la producción de emisiones de contaminantes atmosféricos [1].

Actualmente en México, una gran cantidad de industrias dedicadas a la producción de ladrillos siguen procesos rudimentarios en donde se emplean hornos artesanales alimentados por carbón, leña, estiércol y otras biomásas [2]. Estos hornos generan grandes emisiones de contaminantes que afectan la salud de personas que trabajan o que viven en áreas cercanas a este tipo de industrias.

Entre los principales contaminantes emitidos por los hornos ladrilleros, se encuentran el material particulado (PM), el monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂), metales y el *black carbon* (BC), provenientes de la combustión incompleta. El material particulado es considerado como uno de los seis contaminantes con mayor número de investigaciones en temas de calidad del aire, salud y bienestar para de la población [3].

León, Guanajuato, es una de las ciudades con mayor número de hornos ladrilleros en el estado con más de 300, provocando emisiones altamente contaminantes en la atmosfera de la ciudad y sus alrededores. Además, la producción de ladrillos de manera artesanal se encuentra en el sector informal, por lo que no se cumple con el marco regulatorio aplicable.

El siguiente estudio tiene como finalidad hacer un análisis de la situación salud-ambiental en la zona de hornos ladrilleros, en el Refugio, León Guanajuato, aplicando el modelo Gaussiano para la dispersión de contaminantes atmosféricos, técnica ampliamente utilizada para contaminantes no reactivos que proporciona una aproximación matemática a la dispersión de contaminantes [3]. Finalmente, este documento presenta un perfil ambiental de la emisión de hornos ladrilleros, así como los posibles efectos adversos a la salud para la población potencialmente expuesta.

Materiales y métodos

La estimación de la concentración de contaminantes atmosféricos según el modelo gaussiano, se ejecutó el siguiente procedimiento:

1. Adquisición de datos. Se consultaron los datos mensuales de temperatura atmosférica, velocidad y dirección del viento, radiación solar y presión atmosférica durante el periodo de enero-diciembre del año 2020. Esta información se recuperó de la base de datos de SAPAL, NASA POWER y Visual Crossing Weather. Con base a los datos obtenidos se determinó la Estabilidad de Pasquill [4].
2. Suposición de datos del centro emisor. Para la obtención de la temperatura de emisión, altura y diámetro de la chimenea, velocidad de descarga y la cantidad de emisión del contaminante, se consultó el artículo *"Análisis comparativo de la contaminación atmosférica producida por la combustión en ladrilleras artesanales utilizando tres tipos de combustibles"*[5]. Se asumió que las ladrilleras descargan los contaminantes bajo las condiciones que se obtuvieron en el paso anterior.
3. Aplicación del modelo gaussiano. El cálculo de la dispersión de contaminantes atmosféricos según el modelo gaussiano se realizó empleando la ecuación correspondiente (Ec. 1) programada en lenguaje C++.
4. Análisis de datos. Una vez obtenidos los valores de la concentración de contaminantes atmosféricos, se hizo un análisis estadístico de varianza (ANOVA) con ayuda del software XLSTAT® para determinar la diferencia existente entre los perfiles de distribución entre los meses analizados.

Ecuación 1

$$H = h + \frac{V_s d}{u} \left[1.5 + \left(2.68 \times 10^{-2} (P) \left(\frac{T_s - T_a}{T_s} \right) d \right) \right] \quad X = \left[\frac{E}{\pi S_y S_z U} \right] \left[\exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{Y}{S_y} \right)^2 \right] \right] \left[\exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{S_z} \right)^2 \right] \right]$$

X = Concentración del contaminante (g/m^3)

E = Tasa de emisión del contaminante (g/s)

U = velocidad del viento (m/s)

H = Altura efectiva de la chimenea (m)

h = Altura física de la chimenea (m)

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

d = Diámetro de la chimenea (m)

P = Presión atmosférica (kPa)

T_s = Temperatura de salida del contaminante (K)

T_a = Temperatura atmosférica (K)

Objetivos y Alcance

Este estudio se realizó con el objetivo de estimar la dispersión de contaminantes atmosféricos, generados por la producción del sector ladrillero asentado en el Refugio de la ciudad de León, Guanajuato; así como determinar cuáles son las zonas de mayor afectación por las emisiones generadas. Además, se tiene la finalidad de reconocer sus principales efectos sobre la salud de los leoneses en distintos rangos de edad. Se considera la localización de una chimenea en esta región, ya que tiene una alta actividad de manufactura de ladrillos.

La estimación se hizo para un año, a partir de enero del 2020 y hasta diciembre del mismo año, tomando una distancia de 50 kilómetros a la redonda. Los datos para la incorporación al modelo y para el análisis de las posibles afectaciones a la salud se hicieron en función a una revisión bibliográfica, que nos permitió evaluar el alcance de las dispersiones atmosféricas asumiendo que las ladrilleras están descargando emisiones bajo las condiciones que se explican en este estudio.

Análisis de Inventario y Condiciones de Ejecución de Análisis

Los datos que se muestran a continuación en la *Tabla 1* fueron obtenidos haciendo un promedio de los valores diarios de cada uno de los meses. Para recabar la información en la base de datos de NASA POWER y Visual Crossing Weather, se tomó como punto de análisis a la colonia Ladrilleras del Refugio, con coordenadas (21.087222, -101.551389); y para el caso de SAPAL se tomó como punto de análisis el fraccionamiento Paraíso Real con coordenadas (21.112778, -101.58111). Para determinar el tipo de estabilidad atmosférica se siguió el esquema propuesto por Pasquill.

Tabla 1. Datos meteorológicos Ene-Dic 2020

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Temp. atm ($^{\circ}K$)	289	292	296	297	297	297	297	293	293	294	292	189
Vel. viento (m/s)	4.44	4.40	4.42	5.18	4.80	4.98	4.17	3.62	3.66	4.07	4.06	3.49
Dir. Viento (blowing to)	1.5	11.7	353.9	24.0	0.5	327.8	323.7	331.8	316.3	326.6	330.7	343.1
Rad. solar (W/m^2)	336.5	430.6	475.0	592.5	660.0	624.2	465.1	643.2	345.3	443.6	389.7	338.3
Estabilidad atmosférica	C	B	B	D	B	C	C	C	C	B	B	C

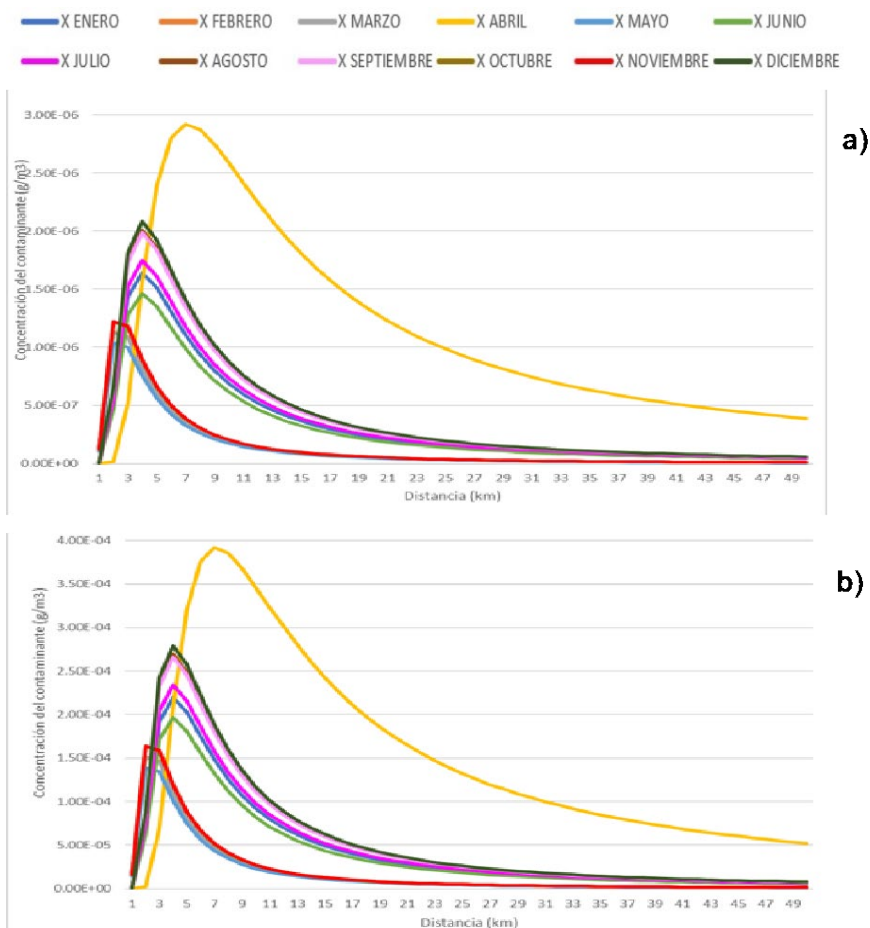
Para la obtención de los datos de un horno ladrillero que descarga bajo las condiciones establecidas en este documento, se consultaron las fuentes [5] y [6], los resultados se muestran en la *Tabla 2*.

Tabla 2. Datos del horno ladrillero

Tipo de productos	Ladrillos sólidos
Producción	600 a 1000 ladrillos por día
Altura (h) del horno	10 metros
Temperatura de salida	635°K
Velocidad de salida	75 m/s
Diámetro interno del horno	0.6 metros

Resultados y discusión

Tomando los datos obtenidos en la *Tabla 1* y *Tabla 2* y haciendo uso de las fórmulas que se muestran en la *Ecuación 1*, se creó un programa en el lenguaje de C++ para calcular la concentración de contaminantes desde el punto de emisión hasta una distancia de 50 kilómetros, los resultados obtenidos se muestran en la *Gráfica 1*. Además, el programa diseñado, se ejecutó también para una emisión de contaminantes de 631.14 g/s; es decir, para la concentración equivalente a los 134 hornos ladrilleros que se encuentran ubicados en la localidad Del Refugio, los resultados se muestran en la *Gráfica 1*.



Gráfica 1. Dispersión de emisiones de (a) 1 horno ladrillero y (b) 134 hornos ladrilleros.

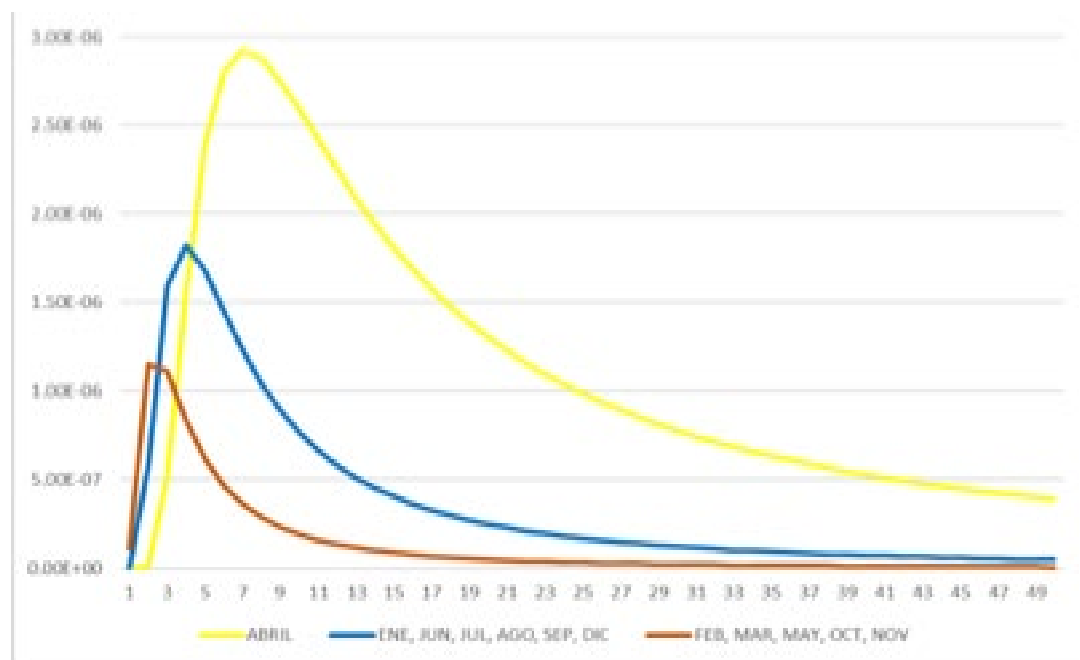
Como se puede observar, algunos meses tienen un comportamiento muy similar; por lo que los podemos crear 3 agrupaciones y determinar a qué distancia alcanzaron su máxima concentración de contaminantes atmosféricos:

Grupo 1: Abril (con 7km de alcance). Este mes difirió bastante al resto, siendo el grupo con el valor más alto en alcance y en concentración; el motivo de este comportamiento fue la estabilidad de Pasquill, que a su vez tiene relación directa con la velocidad del viento y la radiación solar. Abril tuvo el valor más alto en velocidad del viento del año 2020 con 5.18 m/s, siendo que el valor promedio de todo el año fue 4.17m/s; y en cuanto a la radiación solar, abril tuvo un valor de 592.5 W/m², que en comparación con el valor promedio del 2020 (478.67 W/m²) es muy alto.

Grupo 2: Enero, junio, julio, agosto, septiembre y diciembre (con 4km de alcance). Este grupo tuvo valores bajos en la velocidad del viento a comparación del grupo 1 pero aún cerca del promedio. Mientras que su radiación tuvo valores muy variados entre los 336.5 y 624.2.

Grupo 3: Febrero, marzo, mayo, octubre y noviembre (con 2km de alcance). La radiación estuvo en valores 389.7 (con inclinación a este valor) y 660.0 y con velocidad del viento relativamente baja en comparación con el valor promedio de todo el año.

En la Gráfica 3, se muestran los valores de las emisiones clasificados de acuerdo a su comportamiento según los grupos mencionados anteriormente. Además, en las Ilustraciones 1, 2 y 3, se observa la dirección en la que la chimenea emitió los gases de forma mensual, así como la distancia a la que se alcanzó la mayor concentración de contaminantes atmosféricos.



Gráfica 2. Perfil de concentración de emisión de contaminantes agrupados por meses con distribución similar

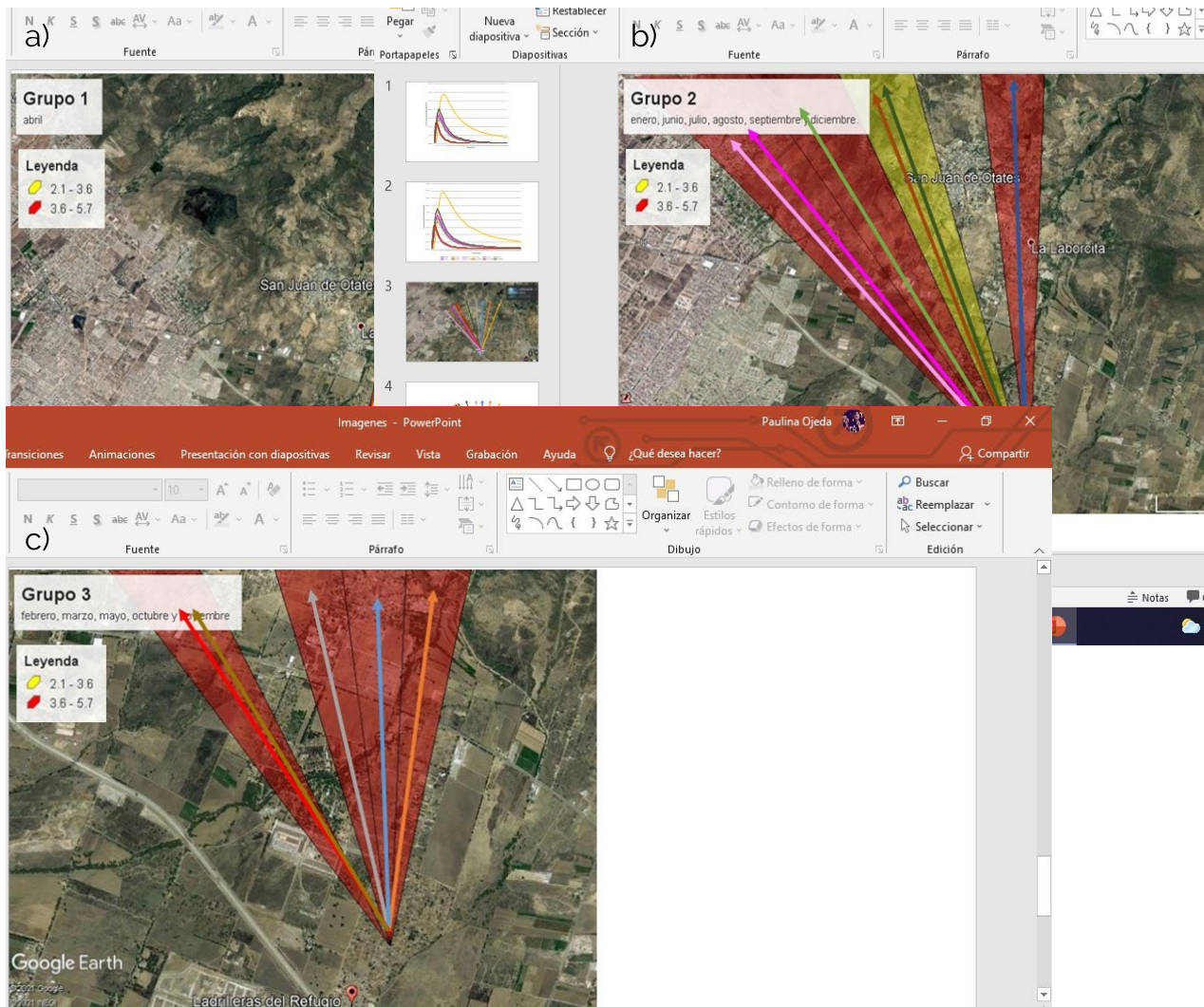


Ilustración 1. Predominancia de la dirección de contaminantes de (a) grupo 1, (b) grupo 2 y, (c) grupo 3, para el periodo de tiempo estudiado.

En estas ilustraciones, podemos visualizar el alcance y la dirección que tomaron las emisiones generadas por el sector ladrillero. Respecto al grupo 1 (correspondiente al mes de abril) se observa que no hay población situada a 7 kilómetros del punto de emisión, por lo que no hay personas perjudicadas por esta industria. Sin embargo, para el grupo 2, a 4 kilómetros, se encuentra la localidad de San Juan de Oates con aproximadamente 2509 personas; y para el caso del grupo 3, a 2 kilómetros esta ubicada la localidad de La Laborcita con alrededor de 1234 personas. Ambas localidades resultan gravemente afectadas por las emisiones que se generan de manera continua por esta industria generadora de ladrillos.

A través de un análisis estadístico de varianza (ANOVA) se comprobó que las diferencias entre los perfiles de dispersión de cada uno de los meses no se deben a las temporadas climáticas; esto debido a que los valores de Pr para las comparaciones entre los cuatrimestres de cada una de las temporadas (primavera, verano, otoño e invierno) fueron numéricamente mayores al nivel de significancia establecido (0.050). En cambio, haciendo un análisis similar al anterior pero haciendo

las comparaciones entre los grupos 1, 2 y 3 mostrados en la *Gráfica 2*, se obtuvieron valores significativamente menores a 0.050. De esta manera, se concluye que las diferencias existentes entre los perfiles de concentración son debidas a la estabilidad atmosférica y no a las estaciones del año.

A continuación, se presenta una tabla con las afectaciones a la salud que pueden tener cada uno de los componentes principales que se emiten en las chimeneas de industrias ladrilleras consultada en la referencia bibliográfica [7].

Tabla 3. Contaminantes atmosféricos y sus efectos en la salud humana.

Contaminante	Descripción	Síntomas	Efectos
PM	Material particulado.	Apnea, ataques de asma, irritación de ojos, nariz y garganta, tos y opresión del pecho.	Respiratorios, cardiovasculares, estrés oxidativo e inflamación y bajo de peso al nacer.
NO ₂	Gas denso, color marrón rojizo de olor acre.	Disnea, tos, flema, irritación de los ojos y garganta, cansancio y falta de aire.	Respiratorios.
SO ₂	Gas soluble en agua e irritante.	Irritación de nariz, ojos y garganta.	Respiratorios y resistencia pulmonar.
CO	Gas incoloro sin olor ni sabor.	Dolor de cabeza, somnolencia, mareos, visión borrosa, náuseas, esfuerzo y falta de aliento	Sistema nervioso central y cardiacos; reducción de capacidad para transferir oxígeno.
Metales	Componentes de la corteza terrestre que no se degradan ni destruyen.	Transtornos de la memoria, sueño, ira, fatiga, temblores en las manos, visión borrosa y dificultad para hablar.	Sistema nervioso, aborto espontáneo, bajo coeficiente intelectual, malformaciones congénitas.
PM: Material particulado NO ₂ : Dióxido de nitrógeno		SO ₂ : Dióxido de azufre CO: Monóxido de carbono	

En la *Tabla 3*, se muestran los principales efectos a la salud provocados por las emisiones atmosféricas generadas por el sector ladrillero. Todos estos contaminantes que se presentan, se han ligado al deterioro en la función pulmonar y aumentos en los ataques cardíacos. Niveles altos de contaminación atmosférica perjudican directamente a personas que padecen asma, enfisema o cualquier otro tipo de enfermedad pulmonar o cardíaca. Las personas mayores y los niños son especialmente vulnerables a los efectos de la contaminación en el aire [5].

Conclusiones

Las emisiones provocadas por el sector ladrillero tuvieron un gran impacto en la población aledaña a la fuente fija de descarga de contaminantes en el año 2020, con valores significativos principalmente para el mes de abril, afectando en mayor medida a las comunidades de La Laborcita, San Juan de Otates y el Sauz. Se obtuvo que un factor determinante es la radiación y la velocidad del viento, pues mientras mayor sean estos valores, aumentará la estabilidad atmosférica según Pasquill, provocando un mayor alcance y una mayor concentración de las emisiones producidas. Los resultados presentados en este estudio, son estimaciones basadas en fuentes electrónica, sin embargo, son una gran aproximación a la situación real que presenta la ciudad de León, Guanajuato.

Con base a lo anterior, la salud de las personas situadas a los alrededores Del Refugio se ve afectada de manera considerable, debido a las grandes concentraciones de contaminantes atmosféricos presentados, por lo que se considera tomar medidas de control para el sector ladrillero y sus emisiones generadas.

Agradecimientos

Se agradece a la Coordinación de Veranos de Investigación de la Universidad de Guanajuato por el apoyo económico otorgado.

Referencias

- [1] M. Vallejo, K. Jáuregui-Renaud, A. G. Hermsillo, M. F. Márquez, y M. Cárdenas, «Efectos de la contaminación atmosférica en la salud y su importancia en la Ciudad de México», *Gac. Médica México*, vol. 139, n.º 1, pp. 57-63, 2003.
- [2] E. Aránguez *et al.*, «Contaminantes atmosféricos y su vigilancia», *Rev. Esp. Salud Pública*, vol. 73, n.º 2, pp. 123-132, 1999.
- [3] A. J. Arrieta-Fuentes, «Dispersión de material particulado (PM 10), con interrelación de factores meteorológicos y topográficos», *Ing. Investig. Desarro.*, vol. 16, n.º 2, pp. 43-54, 2016.
- [4] S. Barba, R. Cedeño, J. Domínguez, y C. A. Cedeño, «Análisis de la concentración contaminante para distintas clases de estabilidad según Pasquill-Gifford aplicado a una fuente industrial fija de emisión de NOx».
- [5] J. L. Jaya Sucozhañay y J. L. Gomezcoello Vásquez, «Análisis comparativo de la contaminación atmosférica producida por la combustión en ladrilleras artesanales utilizando tres tipos de combustibles», 2012.
- [6] B. Cárdenas, U. Aréchiga, J. Munguía, C. Márquez, y A. Campos, «Evaluación preliminar del impacto ambiental por la producción artesanal de ladrillo: eficiencia energética y calidad del aire», *Inf. Inéd. Univ. Autónoma Metrop.-Inst. Nac. Ecol. México*, 2012.
- [7] A. A. Berumen-Rodríguez, F. J. Pérez-Vázquez, F. Díaz-Barriga, L. E. Márquez-Mireles, y R. Flores-Ramírez, «Revisión del impacto del sector ladrillero sobre el ambiente y la salud humana en México», *Salud Pública México*, vol. 63, n.º 1, pp. 100-108, 2021.