

Enviado: 19/12/2025

Aceptado: 06/01/2025

Publicado: 01/02/2026

<https://doi.org/10.65937/ciudadglocal.2026.22.2.1>

Salud ambiental y función pulmonar en trabajadores de la industria ladrillera de Tlajomulco de Zúñiga

Environmental Health and Pulmonary Function in Workers of the Brickmaking Industry in Tlajomulco de Zúñiga

Clarissa Canales Barrera

Estudiante de la licenciatura en Médico Cirujano y Partero en el Centro Universitario de Tlajomulco (CUTLAJO), Universidad de Guadalajara. Participante del Programa de Fomento a la Investigación "Delfín, 2025". Correo electrónico: clarissa.canales5776@alumnos.udg.mx ORCID id: <https://orcid.org/0009-0008-0677-2876>

Fátima Daniela Medina Gómez

Estudiante de la licenciatura en Médico Cirujano y Partero en el Centro Universitario de Tlajomulco (CUTLAJO), Universidad de Guadalajara. Participante del Programa de Fomento a la Investigación "Delfín, 2025". Correo electrónico: fatima.medina8111@alumnos.udg.mx ORCID id: <https://orcid.org/0009-0009-4131-8238>

Gabriel González García

Estudiante de la licenciatura en Médico Cirujano y Partero en el Centro Universitario de Tlajomulco (CUTLAJO), Universidad de Guadalajara. Participante del Programa de Fomento a la Investigación "Delfín, 2025". Correo electrónico: gabrielglezg140204@gmail.com ORCID id: <https://orcid.org/0009-0009-6044-3499>

Laura Karina Salas Salazar

Jefa del Departamento de Vida Saludable y Promoción de la Salud del Centro Universitario de Tlajomulco (CUTLAJO). SNII Nivel I. Universidad de Guadalajara. Cuerpo Académico UDG-CA 1225 Estudios de Sostenibilidad y Grupos Vulnerables. Correo electrónico: laura.salas@cutlajomulco.udg.mx ORCID id: <https://orcid.org/0009-0006-8656-2750>



Esta obra está bajo una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial SinDerivadas4.0 Internacional.

Gustavo Adolfo Rosales Chávez

Profesor de Neumología del Centro Universitario de Tlajomulco (CUTLAJO). Universidad de Guadalajara. Correo electrónico:

gustavo.rosales@academicos.udg.mx ORCID id: <https://orcid.org/0000-0002-8275-8004>

Resumen

La producción artesanal de ladrillo es una actividad económica relevante en zonas periurbanas de México; sin embargo, suele realizarse en informalidad y pobre regulación ambiental. En Tlajomulco de Zúñiga esta industria impacta en la calidad del aire y expone a trabajadores y comunidades cercanas a riesgos respiratorios. El objetivo del estudio fue evaluar los niveles de material particulado PM_{2.5} y PM₁₀ en un parque ladrillero y analizar su asociación con la función pulmonar de los trabajadores. Mediante un diseño observacional transversal se midieron PM_{2.5} y PM₁₀ en tres zonas del parque, comparando los resultados con los límites de la OMS y SEMARNAT. Además, se aplicaron encuestas y espirometrías a 36 trabajadores, interpretadas según estándares internacionales. La zona de horneado presentó las mayores concentraciones de PM_{2.5} llegando hasta 2624.9 µg/m³, excediendo más de 50 veces los límites establecidos por la OMS y la SEMARNAT. En cuanto a PM₁₀, el valor máximo alcanzó 4496.2 µg/m³ rebasando más de 100 veces el límite de la OMS. En la evaluación de la función pulmonar (n=36), el 19.5% de los trabajadores presentaron un patrón obstructivo y se identificó una correlación negativa significativa entre los años trabajados y la relación FEV₁/FVC ($\rho = -0.347$; $p = 0.038$). Los hallazgos muestran

cómo dicha actividad económica ubicada en la periferia urbana puede generar degradación ambiental sin que sus efectos en salud se manifiesten inmediatamente. Esta situación revela formas de vulnerabilidad estructural asociadas a la producción del espacio urbano donde la exposición ambiental, la informalidad laboral y la limitada vigilancia sanitaria convergen.

Palabras clave: Exposición laboral, Industria ladrillera, Zonas periurbanas, Salud ocupacional, Función pulmonar, Contaminación ambiental.

Abstract

Artisanal brick production is a relevant economic activity in peri-urban areas of Mexico; however, it is often carried out under conditions of informality and poor environmental regulation. In Tlajomulco de Zúñiga, this industry impacts air quality and exposes workers and nearby communities to respiratory risks. The aim of the study was to assess PM_{2.5} and PM₁₀ particulate matter levels in a brick kiln cluster and to analyze their association with workers' lung function. Using a cross-sectional observational design, PM_{2.5} and PM₁₀ were measured in three zones of the cluster, and results were compared with WHO and SEMARNAT limits. In addition, surveys and spirometry tests were administered to 36 workers and interpreted according to international standards. The firing zone showed the highest PM_{2.5} concentrations, reaching up to 2624.9 µg/m³, exceeding WHO and SEMARNAT limits by more than 50 times. As for PM₁₀, the maximum value reached 4496.2

$\mu\text{g}/\text{m}^3$, surpassing the WHO limit by more than 100 times. In the lung function assessment ($n=36$), 19.5% of workers presented an obstructive pattern, and a significant negative correlation was identified between years worked and the FEV1/FVC ratio ($\rho=-0.347$; $p=0.038$). The findings show how this economic activity, located in the urban periphery, can generate environmental degradation without immediate manifestations of health effects. This situation reveals forms of structural vulnerability associated with the production of urban space, where environmental exposure, labor informality, and limited health surveillance converge.

Keywords: Occupational exposure, brick-making industry, periurban areas, occupational health, lung function, environmental pollution.

Introducción

La producción artesanal de ladrillo constituye una de las principales actividades económicas en numerosos territorios periurbanos en México y América Latina, ya que permite el abastecimiento de insumos básicos para la expansión urbana y el sector de la construcción. Sin embargo, esta actividad se desarrolla, en la mayoría de los casos, bajo condiciones de informalidad productiva, baja tecnificación y limitada regulación ambiental, lo que la convierte en una fuente relevante de degradación ambiental local y de exposición ocupacional a contaminantes atmosféricos. Debido a esto, la industria ladrillera artesanal representa un ejemplo

paradigmático de un fenómeno glocal: responde a dinámicas económicas y demandas urbanas de gran escala, generalmente habitados por poblaciones socialmente vulnerables.

De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), en México, existen aproximadamente 17,000 talleres ladrilleros, en su mayoría de carácter artesanal, que utilizan tecnologías tradicionales de cocción y combustibles de bajo costo y fácil acceso. El tipo de horno más frecuente es el horno tradicional fijo (alrededor del 75%), seguido del horno de campaña (22%) y, en una proporción mínima, el horno tipo MK2. Estos sistemas emplean biomasa forestal y una amplia variedad de residuos -orgánicos, de manejo especial e incluso residuos peligrosos, como aceites usados, textiles, llantas y plásticos- lo que incrementa de manera significativa las emisiones de material particulado ($\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10}), hidrocarburos aromáticos policíclicos, dióxido de azufre y otros contaminantes atmosféricos con efectos nocivos sobre la salud humana y el ambiente.

En el estado de Jalisco, la industria ladrillera ocupa un lugar relevante en términos productivos y el municipio de Tlajomulco de Zúñiga se ha consolidado como uno de los territorios donde esta actividad se concentra. Según el Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), en 2024 se registraron en el municipio 47 establecimientos dedicados a la fabricación de productos de arcilla para la construcción, sin considerar aquellos que

operan fuera de los registros formales. Esta concentración de talleres en zonas periurbanas genera paisajes productivos caracterizados por altos niveles de contaminación atmosférica local, que afectan tanto a los trabajadores como a las poblaciones circundantes.

La exposición crónica a material particulado fino se ha asociado de manera consistente con una mayor incidencia de enfermedades respiratorias tales como bronquitis, Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica (EPOC), asma e infecciones respiratorias, así como con alteraciones subclínicas de la función pulmonar. No obstante, en contextos de informalidad productiva y escasa vigilancia ambiental, como el de la industria ladrillera artesanal, estas exposiciones suelen permanecer ocultas y poco documentadas, especialmente desde una perspectiva que integre simultáneamente las dimensiones ambiental, ocupacional, social y territorial del problema.

En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo evaluar los niveles de material particulado PM2.5 y PM10 en diferentes zonas de un parque ladrillero del municipio de Tlajomulco de Zúñiga y analizar su asociación con la función pulmonar de los trabajadores expuestos. A través de este abordaje se busca no sólo aportar evidencia sobre la magnitud de la contaminación ambiental generada por esta actividad, sino también contribuir a la comprensión de sus implicaciones en términos de salud ocupacional e injusticia ambiental en territorios periurbanos, donde los beneficios económicos de la producción se distribuyen de manera

desigual frente a los costos ambientales y sanitarios que recaen predominantemente sobre poblaciones específicas.

Metodología

Se realizó un estudio observacional, transversal y analítico para evaluar los niveles de contaminación ambiental de la producción artesanal de ladrillo en Tlajomulco de Zúñiga mediante la medición de PM2.5 y PM10, así como identificar las asociaciones de la exposición ocupacional a contaminantes atmosféricos sobre la función pulmonar de los trabajadores de la industria ladrillera en el municipio de Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco.

Para la evaluación de los niveles de contaminantes ambientales, el día 17 de junio del 2025 se realizaron mediciones de las concentraciones de PM2.5 y PM10 en tres zonas estratégicas del parque ladrillero el cual fue seleccionado como muestra por conveniencia. La zona periférica (donde se trasladan los trabajadores a sus lugares de labores y se cargan los ladrillos en los camiones que posteriormente los distribuirán), la zona de fabricación (en la que los trabajadores hacen la mezcla y moldeado del ladrillo) y la zona de horneado (donde se localizan los hornos empleados para la cocción de los ladrillos). Se realizaron 60 mediciones seriadas en cada una de las zonas antes mencionadas mediante un dispositivo portátil desarrollado por el departamento de ingeniería mecatrónica del Centro Universitario de Tlajomulco el cual funciona mediante el sensor SENSIRION SEN 54 el cual es capaz de medir

concentraciones de PM 1.0, PM2.5, PM4 y PM10, así como Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC) y humedad relativa, calibrado según TSI DustTrak™ DRX 8533 Ambient Mode. Presenta error estándar de ~10% para las concentraciones de material particulado, ~4.5% para la humedad relativa y ~15 puntos índice en los VOC, lo cual representa una limitación, ya que los valores obtenidos tendrán dicho margen de error.

Posteriormente, el análisis se realizó con estadística descriptiva y comparación con los límites establecidos por la NOM-025-SSA1-2014 (SEMARNAT/SSA) y las guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Para la ejecución del proyecto, se establecieron alianzas estratégicas con el H. Ayuntamiento de Tlajomulco de Zúñiga, el Hospital Civil de Guadalajara “Dr. Juan I. Menchaca” y el Centro Universitario de Tonalá, lo que permitió garantizar el acceso al campo, la capacitación técnica y el soporte metodológico.

Por otro lado, en el componente de salud se incluyeron a trabajadores activos de la industria ladrillera mayores de 18 años que aceptaron participar de manera voluntaria y firmaron el consentimiento informado, con lo cual se aplicaron 43 encuestas estructuradas a trabajadores de tres ladrilleras ubicadas en Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco las cuales fueron seleccionadas por conveniencia. Del total de 43 participantes, se realizaron únicamente 39 pruebas espirométricas debido a que no se realizaron dichas evaluaciones en participantes con

contraindicaciones médicas para la realización de la maniobra. 36 espirometrías cumplieron con los criterios de calidad y aceptabilidad de la European Respiratory Society. Se excluyeron las espirometrías que no cumplieron con dichos criterios, así como aquellas en las que había incapacidad para realizar la maniobra de forma adecuada. Por lo anterior el tamaño de la muestra se redujo a 36 (n=36).

La interpretación de los resultados espirométricos se realizó conforme a los criterios de la European Respiratory Society, evaluando patrones restrictivos y obstructivos. Los patrones obstructivos se clasificaron en leve, moderado y severo según la puntuación Z del FEV1. Asimismo, se determinó el Límite Inferior de la Normalidad (LIN) del cociente FEV1/FVC utilizando las ecuaciones de referencia GLI, ajustadas por edad, sexo, talla y etnia. Para el análisis estadístico se utilizó la prueba t de Student para la comparación de las medias de los parámetros de función pulmonar (FEV1, FVC, FEV1/FVC) entre grupos de exposición diferenciados.

Además, se aplicó la prueba de Chi-cuadrada (χ^2) con el fin de evaluar la asociación entre los patrones espirométricos obtenidos y la etapa del proceso de elaboración del ladrillo en la que se encontraban los trabajadores. De manera adicional, se empleó la correlación de Pearson (r) para determinar la relación lineal entre el tiempo de exposición laboral (expresado en años) y los valores de función pulmonar. Todos los análisis estadísticos fueron efectuados mediante el software Statistical Package for the Social Sciences [SPSS, versión

29.0.2.0 (20)], estableciendo un nivel de significancia estadística de $p < 0.05$.

Resultados

A partir de las 60 mediciones realizadas en cada una de las zonas antes descritas del parque ladrillero se obtuvieron las concentraciones presentadas en la **Tabla 1** (ANEXOS), en la que se puede identificar que la zona 1 es la que presentó menores concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀, lo que contrasta fuertemente con la zona 3 de horneado en la que se obtuvieron cifras de hasta 2624.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{2.5} y hasta 4496.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM₁₀.

Tabla 1.

Resultados de las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ en las 3 localizaciones muestreadas del parque ladrillero.

ID	Zona 1: periférica		Zona 2: de fabricación		Zona 3: de horneado	
	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀
1	22.3	22.3	1184.3	2031.1	1037.9	1474.7
2	22.3	22.3	1184.1	2030.6	1073.9	1567.3
3	22.3	22.3	1183.1	2028.7	1199.3	1795.2
4	22.4	22.4	1181.6	2025.4	1337.6	2044.9
5	22.4	22.4	1179.1	2020.1	1463.4	2276
6	22.5	22.5	1177	2015.5	1589.7	2507.1
7	22.6	22.6	1175.8	2012.8	1727.4	2755.7
8	22.8	22.8	1175.1	2011.3	1829.1	2945.7
9	22.9	22.9	1174.9	2010.9	1893	3073
10	23	23	1175	2011.1	1926.6	3148.8
11	23.2	23.2	1175	2011.2	1945	3197.2
12	23.2	23.2	1174.5	2010.3	1991	3303.3
13	23.3	23.3	1173.6	2008.7	2010.9	3348.6
14	23.5	23.5	1172.2	2006.1	2032.8	3396
15	23.6	23.6	1169.1	1999.9	2052.9	3439.3
16	23.7	23.7	1161.8	1985.8	2072.7	3481.1
17	23.7	23.7	1157.4	1977	2091	3519.5
18	23.7	23.7	1152.9	1967.9	2107.5	3554.1
19	23.8	23.8	1148.7	1959.4	2122.8	3585.9
20	23.7	23.7	1145.4	1952.5	2137	3615.4
21	23.7	23.7	1143.6	1948.9	2150.7	3643.5
22	23.6	23.6	1142.8	1947.4	2164.1	3670.6
23	23.5	23.5	1142.5	1947.1	2177.4	3696.9
24	23.4	23.4	1141.7	1945.6	2189.8	3721.6

25	23.3	23.3	1141	1944.2	2202.4	3746
26	23.2	23.2	1140.3	1942.7	2214.3	3769.1
27	23	23	1139.2	1940.5	2225.3	3790.2
28	22.8	22.8	1138.7	1939.6	2234.8	3808.7
29	22.4	22.4	1138	1938.3	2243.2	3825.1
30	22.3	22.3	1137.5	1937.4	2264.5	3864.8
31	22.2	22.2	1137	1936.6	2282.6	3897.2
32	22.1	22.1	1137.6	1937.9	2305.8	3938
33	22.1	22.1	1138.4	1939.6	2324.1	3970.4
34	22	22	1141	1945.2	2341.1	4000.6
35	22	22	1142.6	1948.4	2356.1	4027.2
36	21.8	21.8	1143.4	1949.9	2367.5	4047.6
37	21.7	21.7	1143.9	1951.1	2381.1	4071.7
38	21.5	21.5	1144.6	1952.5	2400.2	4105.1
39	21.4	21.4	1145.6	1954.4	2412.8	4127.4
40	21.4	21.4	1145.6	1954.5	2421	4141.9
41	21.4	21.4	1145.4	1954.1	2427.2	4153
42	21.3	21.3	1144.1	1951.1	2436.5	4169.4
43	21.3	21.3	1142.9	1948.6	2459.1	4208.6
44	21.4	21.4	1141	1944.4	2474.5	4235.3
45	21.5	21.5	1139.5	1941	2484	4251.9
46	21.5	21.5	1136.7	1935	2489.7	4262
47	21.5	21.5	1132	1925.1	2494.1	4269.9
48	21.4	21.4	1123.1	1906.6	2500.6	4281.6
49	21.4	21.4	1112.7	1884.8	2502.1	4284.5
50	21.4	21.4	1102.2	1862.8	2502.3	4285
51	21.5	21.5	1093.7	1844.7	2500.7	4282.6
52	21.5	21.5	1083.4	1822.6	2498.3	4278.6
53	21.6	21.6	1083	1821.3	2495.7	4274.3
54	21.6	21.6	1084.2	1823.2	2493	4270
55	21.7	21.7	1087.6	1829.7	2490.5	4265.7
56	21.7	21.7	1090.8	1835.8	2487.9	4261.4
57	21.8	21.8	1094.4	1842.9	2485.4	4257.2
58	21.8	21.8	1098.5	1851.1	2487.9	4261.6
59	21.8	21.8	1102.2	1858.3	2510.9	4300.9
60	21.8	21.8	1106.1	1866	2624.9	4496.2

Nota: ID: Identificar de toma. PM 2.5: material particulado fino de menos de 2,5 μm . PM 10: material particulado de menos de 10 μm .

Fuente: Elaboración propia con datos de campo.

Los datos anteriores fueron promediados y se identificó el pico máximo de cada una de las zonas, lo cual posteriormente fue comparado con los límites establecidos por la OMS y la SEMARNAT (**Tabla 2**). Las guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre (2005) establecen como valores máximos permisibles para PM₁₀ 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas, y para PM_{2.5} 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas. Por su parte, la 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” describe como valores máximos permisibles en el territorio nacional 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10 y a 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2.5 en 24 horas.

Tabla 2.

Comparación de las concentraciones de PM2.5 y PM10 medidas en las zonas del parque ladrillero con los valores máximos permisibles establecidos por la OMS y la SEMARNAT.

	Valores máx. permisibles en 24h		Valores estándar Tlajo. en 24h	Valores obtenidos					
	SM RT	OMS	27/06/25	Perif.	Fabricación		Horneado		
				Md	Pmáx	Md	Pmáx	Md	Pmáx
PM2.5	45	25	8	22.05	23.8	1145.2	1184.3	1831.4	2624.9
PM10	75	50	23	22.05	23.8	1948.55	2031.1	2985.45	4496.2

Notas: Md= Mediana; Pmáx= Pico máximo; SMRT = SEMARNAT; Perif= Periferia; PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$); PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y de Recursos Naturales. OMS: Organización Mundial de la Salud. PM 2.5: material particulado fino de menos de 2,5 μm . PM 10: material particulado de menos de 10 μm .

Fuente: Elaboración propia con datos de campo.

En la zona periférica (zona 1) el valor promedio de las concentraciones de PM2.5 fue de 22.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que la concentración máxima fue de 23.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por su parte el promedio de las concentraciones de PM10 como su punto máximo presentaron los mismos valores que los del PM2.5. Ninguno de estos contaminantes superó los valores máximos establecidos por la OMS y la SEMARNAT (**Tabla 3**).

Por otro lado, en la zona 2 o de fabricación las concentraciones tanto de PM2.5 como de PM10 rebasan significativamente los límites máximos

permisibles. En cuanto a PM2.5, su concentración promedio en esta área fue de 1145.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, alcanzando picos de hasta 1184.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, hasta 26.3 veces el límite de SEMARNAT y 47.4 veces el valor máximo de la OMS. De la misma manera, las concentraciones de PM10 promedio fueron de 1948.55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ llegando a cifras de 2031.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ siendo así hasta 27.1 y 40.6 veces superiores a los límites establecidos por la SEMARNAT y la OMS, respectivamente.

La zona 3 (de horneado) fue la que presentó las mayores concentraciones de material particulado. La concentración promedio de PM2.5 fue de 1831.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que su pico máximo fue de 2624.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ excediendo 58.3 veces el límite de SEMARNAT y 105 veces el de la OMS. En cuanto a PM10, el valor promedio fue de 2624.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, en tanto que su concentración máxima alcanzó hasta 4496.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ rebasando más de 100 veces el valor límite permisible por la Organización Mundial de la Salud.

Tabla 3.

Veces que se superaron los límites normativos de material particulado acorde a la OMS y a la SEMARNAT en las zonas de muestreo del parque ladrillero.

Norma	Contaminante	Zona	Límite	Prom	Pico
SEMARNAT	PM2.5	1	45	0.49	0.53
SEMARNAT	PM2.5	2	45	25.45	26.32
SEMARNAT	PM2.5	3	45	40.70	58.33
SEMARNAT	PM10	1	75	0.29	0.32
SEMARNAT	PM10	2	75	25.98	27.08
SEMARNAT	PM10	3	75	39.81	59.95
OMS	PM2.5	1	25	0.88	0.95
OMS	PM2.5	2	25	45.81	47.37
OMS	PM2.5	3	25	73.26	105.0
OMS	PM10	1	50	0.44	0.48
OMS	PM10	2	50	38.97	40.62
OMS	PM10	3	50	59.71	89.92

Notas: Los valores representan la razón entre la concentración medida y el valor límite normativo. Valores >1 indican excedencia del límite.

Zona 1= Periférica, **Zona 2=** Fabricación, **Zona 3=** Horneado. Límite ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y de Recursos Naturales. OMS: Organización Mundial de la Salud. PM 2.5: material particulado fino de menos de $2,5 \mu\text{m}$. PM 10: material particulado de menos de $10 \mu\text{m}$.

Fuente: Elaboración propia con datos de campo.

En cuanto a las características sociodemográficas, el 100% de los participantes fueron hombres ($n=36$). La edad presentó una media de 46.81 ± 14.9 años, con un rango de 20 a 67 años y una mediana de 47 años.

La mayor parte de los trabajadores reportó participar en más de una etapa del proceso de elaboración del ladrillo. La etapa más frecuente fue la mezcla de materiales (83.3%), seguido de las etapas de recolección de materiales, secado y horneado, cada una con una participación del 69.4%. Finalmente, la etapa de distribución fue la menos frecuente con 30.6%.

Respecto a los patrones espirométricos identificados, la mayoría de los trabajadores presentó una espirometría normal (80.6%). Entre los patrones alterados, se observó un patrón obstructivo leve en el 11.1% de los trabajadores, seguido del patrón obstructivo moderado (5.6%) y el patrón obstructivo severo (2.8%). No se identificaron patrones restrictivos en la muestra evaluada.

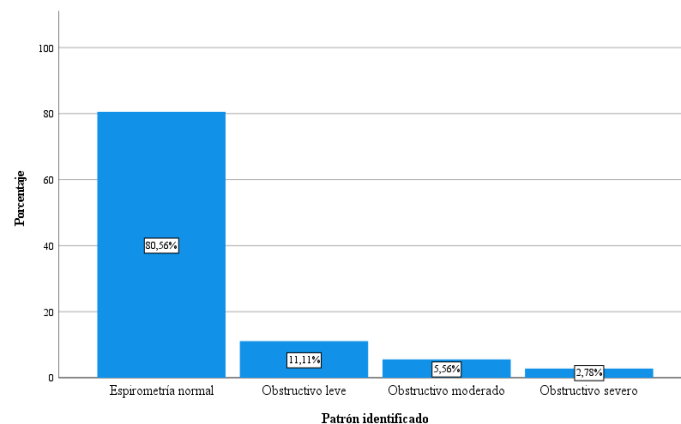
Tabla 4.

Patrones espirométricos en trabajadores de la industria ladrillera.

	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido
Espirometría normal	29	80.6	80.6
Obstructivo leve	4	11.1	11.1
Obstructivo moderado	2	5.6	5.6
Obstructivo severo	1	2.8	2.8
Total	36	100	100

Notas: Se presentan la frecuencia y el porcentaje de trabajadores con espirometría normal y patrones obstructivos leves, moderados y severos. No se identificaron patrones restrictivos.

Fuente: Elaboración propia con datos de campo.



Gráfica 1.

Distribución de los patrones espirométricos en trabajadores de la industria ladrillera.

Fuente: Elaboración propia con datos de campo.

Se compararon los valores de la capacidad vital forzada (FVC) entre los trabajadores que participaban en la etapa de horneado y aquellos que no. La variable mostró una

distribución normal, por lo que se aplicó la prueba t de Student, sin encontrarse diferencias estadísticamente significativas entre ambos grupos ($p \geq 0.05$).

Tabla 5.

Comparación de la capacidad vital forzada (FVC) según la participación en la etapa de horneado.

<i>Participación en horneado</i>	<i>N</i>	<i>Media</i>	<i>Desviación estándar</i>
No	11	4.22	0.554
Si	25	4.21	0.93

Notas: Se compararon los valores de FVC entre los trabajadores que participaron y los que no participaron en la etapa de horneado. La variable presentó una distribución normal, por lo que se aplicó la prueba t de Student ($t=0.004$, $p=0.997$). No se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos ($p \geq 0.05$).

Fuente: Elaboración propia con datos de campo.

De forma similar, los valores del volumen espiratorio forzado durante el primer segundo (FEV1) mostraron una distribución normal y se aplicó la prueba t de Student; sin embargo, no se observaron diferencias estadísticamente significativas al comparar a los trabajadores con y sin participación en la etapa de horneado ($p \geq 0.05$).

Tabla 6.

Comparación del volumen espiratorio forzado durante el primer segundo (FEV1) según la participación en la etapa de horneado.

<i>Participación en horneado</i>	<i>N</i>	<i>Media</i>	<i>Desviación estándar</i>
No	11	3.26	0.750
Si	25	3.00	0.840

Notas: Se compararon los valores de FEV1 entre los trabajadores que participaron y los que no participaron en la etapa de horneado. La variable presentó una distribución normal, por lo que se aplicó la prueba t de Student ($t=0.875$, $p=0.388$). No se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los grupos ($p \geq 0.05$).

Fuente: Elaboración propia con datos de campo.

Asimismo, la relación FEV1/FVC fue evaluada; no obstante, esta variable no presentó una distribución normal por lo que se aplicó la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre trabajadores con y sin participación en la etapa de horneado ($p \geq 0.05$).

Tabla 7.

Relación FEV1/FVC según la participación en la etapa de horneado.

<i>Participación en horneado</i>	<i>N</i>	<i>Rango promedio</i>	<i>Suma de rangos</i>
No	11	19.64	216.00
Si	25	18.00	450.00

Notas: La relación FEV1/FVC no presentó una distribución normal, por lo que se aplicó la prueba no paramétrica U de Mann-Whitney ($U=125.000$, $p=0.688$) para la comparación entre grupos. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p \geq 0.05$).

Fuente: Elaboración propia con datos de campo.

De esta forma, se evaluó la asociación entre patrones espirométricos normales y alterados y su relación con la participación en la etapa de horneado por medio de tablas de contingencia. Debido a la presencia de recuentos esperados bajos, se empleó la prueba exacta de Fisher, no obstante, no se identificó una asociación

estadísticamente significativa entre ambas variables (p=1.000).

Tabla 8.
Asociación entre patrones espirométricos y participación en la etapa de horneado.

Table with 5 columns: Category, Sub-category, Participa en la etapa de horneado (No, Si), and Total. Rows include Normal and Alterado groups with counts and percentages.

Notas: Se muestran los recuentos y porcentajes de trabajadores con patrones espirométricos normales y alterados de acuerdo a su participación en la etapa de horneado. La prueba exacta de Fisher mostró que no hay una asociación significativa entre ambas variables (significación exacta bilateral=1).

Fuente: Elaboración propia con datos de campo.

Finalmente, dado que los años trabajados no presentaron una distribución normal, se utilizó la prueba de correlación de Spearman para evaluar su relación con los parámetros de función pulmonar. No se observó una correlación significativa entre

los años trabajados y la capacidad vital forzada (p=0.015; p=0.931) ni con el volumen espiratorio forzado durante el primer segundo (p=-0.146; p=0.394). Sin embargo, se identificó una correlación negativa significativa entre los años trabajados y la relación FEV1/FVC (p=-0.347; p=0.038).

Tabla 9.
Correlación entre años trabajados y parámetros de función pulmonar.

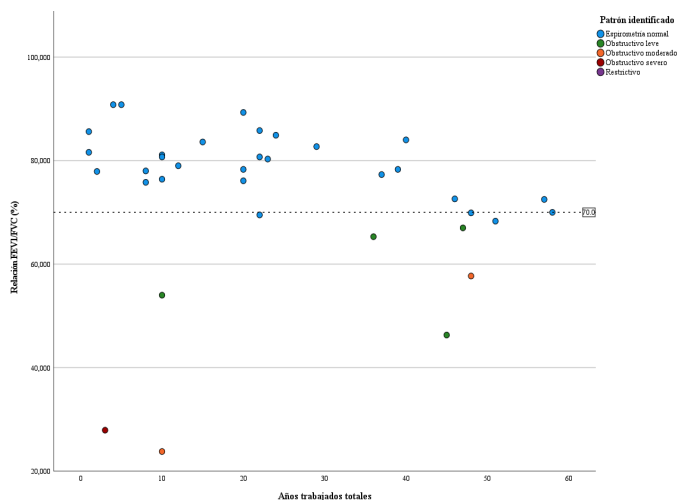
Table with 5 columns: Años trabajados totales, Capacidad vital forzada (FVC), Vol. respiratorio forzado durante el primer segundo (FEV1), Relación FEV1/FVC, and Coef. corr. Rows show correlation coefficients and significance levels.

*. La correlación es significativa en el nivel 0.05 (bilateral)

Notas: Se muestra la correlación de Spearman (p) entre los años trabajados y los parámetros de función pulmonar. Se identificó una correlación negativa significativa entre los años trabajados y la relación FEV1/FVC (p=-0.347; p=0.038). No se observaron correlaciones significativas con FVC ni FEV1.

Fuente: Elaboración propia con datos de campo.

En la Gráfica 2 Cada punto representa a un trabajador, coloreado según el patrón espirométrico identificado. La línea discontinua indica el valor de referencia del 70%, punto de corte para la identificación de obstrucción. Se observa una correlación negativa significativa entre los años trabajados y la relación FEV1/FVC (p=-0.347; p=0.038).



Gráfica 2.

Relación entre los años trabajados y el cociente FEV1/FVC.

Fuente: Elaboración propia con datos de campo.

Discusión

El presente estudio evaluó los niveles de contaminantes ambientales PM_{2.5} y PM₁₀ de la producción artesanal de ladrillo en el municipio de Tlajomulco de Zúñiga y su relación con la función pulmonar de los trabajadores expuestos, documentando concentraciones extremadamente elevadas de dicho material particulado, principalmente en las zonas de fabricación y horneado. Dichos niveles superaron de manera significativa tanto los límites establecidos por la normatividad nacional como por las guías internacionales de calidad del aire, lo que confirma que la industria ladrillera artesanal constituye una fuente relevante de contaminación atmosférica local, con potenciales efectos adversos no sólo para los trabajadores que se exponen de forma directa, sino también para las

comunidades que habitan en los territorios circundantes.

Las concentraciones máximas de PM_{2.5} registradas, que alcanzaron valores superiores a 4,000 µg/m³ en la zona de horneado, reflejan condiciones de exposición aguda altamente nocivas y de magnitud excepcional en comparación con las reportadas en otros contextos urbanos e industriales. Estos niveles exceden en más de dos órdenes de magnitud los valores recomendados por la OMS y concuerdan con estudios nacionales que señalan la quema de biomasa y residuos como una de las principales fuentes de partículas finas en este sector productivo. La precariedad tecnológica de los hornos, junto con la ausencia de sistemas de controles de emisiones, explica en gran medida la magnitud de las concentraciones observadas y evidencia una forma de producción característica de territorios periurbanos donde convergen dinámicas globales de demanda con arreglos productivos locales informales y ambientalmente intensivos.

En el componente de salud, si bien la mayoría de los trabajadores evaluados presentó patrones espirométricos dentro de rangos considerados normales, se identificó una proporción no despreciable de alteraciones obstructivas, principalmente en grado de leve y moderado. Este hallazgo es consistente con la evidencia que asocia la exposición crónica a material particulado con procesos inflamatorios de la vía aérea y deterioro progresivo de la función pulmonar, incluso en ausencia de sintomatología clínica manifiesta. La ausencia de patrones restrictivos podría

explicarse tanto por la naturaleza del contaminante predominante, que se asocia con mayor frecuencia a daño obstructivo, como por el perfil relativamente activo y laboralmente funcional de la población estudiada, lo que sugiere la posible presencia de un sesgo del trabajador sano.

No se identificaron diferencias estadísticamente significativas en los parámetros espirométricos (FVC, FEV1 y FEV1/FVC) al comparar a los trabajadores que participaban en la etapa de horneado frente a aquellos que no lo hacían. Este resultado sugiere que la exposición a contaminantes atmosféricos dentro del parque ladrillero no se restringe a una fase específica del proceso productivo, sino que se distribuye de manera generalizada en el área, afectando a la población trabajadora. La participación simultánea en distintas etapas productivas refuerza la noción de un entorno ambiental compartido más que de riesgos diferenciados por actividad.

Sin embargo, la correlación negativa significativa identificada entre los años trabajados y la relación FEV1/FVC sugiere la presencia de un efecto acumulativo de la exposición ocupacional a contaminantes atmosféricos sobre la función pulmonar, particularmente sobre el componente obstructivo. Este hallazgo es relevante, ya que indica que el daño respiratorio puede desarrollarse de manera progresiva y subclínica, aun cuando los valores individuales se mantengan dentro de rangos considerados normales en un momento determinado. Este comportamiento es consistente con lo reportado en la

literatura, donde se ha descrito un deterioro gradual del cociente FEV1/FVC asociado a exposiciones crónicas a material particulado y gases de combustión.

No obstante, el presente estudio presenta algunas limitaciones a considerar. En primer lugar, el tamaño de la muestra fue relativamente reducido y se obtuvo mediante un muestreo por conveniencia, lo cual limita la generalización de los resultados obtenidos frente a otros entornos ladrilleros, aunque no invalidan la relevancia territorial de los resultados obtenidos.

Adicionalmente, la evaluación de la exposición se realizó mediante mediciones ambientales por zona y no a través de un monitoreo personal individual, por lo que las concentraciones registradas representan niveles ambientales del entorno laboral y no el riesgo ocupacional de cada trabajador. Esta aproximación puede generar una clasificación no diferencial de la exposición, lo que podría atenuar las asociaciones observadas entre contaminación y función pulmonar. No obstante, la magnitud de las concentraciones y su amplia excedencia respecto a los límites normativos permiten afirmar la existencia de un entorno ambiental altamente nocivo.

Finalmente, el análisis de salud se realizó desde una escala poblacional y territorial, por lo que no se incorporaron de manera exhaustiva características clínicas individuales que pudieran actuar como factores de confusión, respondiendo al

objetivo del estudio, permitiendo la documentación de la influencia de un territorio ambientalmente degradado se expresa en indicadores de salud de una población laboralmente expuesta.

En conjunto, los resultados del estudio evidencian una disociación entre la magnitud del impacto ambiental documentado y las alteraciones funcionales detectadas mediante la evaluación espirométrica, lo que no excluye la posibilidad de daño subclínico ni el desarrollo de enfermedad respiratoria crónica a largo plazo. Desde una perspectiva socioambiental, estos hallazgos ponen en evidencia una situación de vulnerabilidad estructural en la que confluyen informalidad laboral, elevada exposición ambiental, limitada vigilancia sanitaria y escaso acceso a medidas preventivas, concentrando de manera desproporcionada los riesgos ambientales y sanitarios en trabajadores y comunidades periurbanas.

El presente estudio enseña la necesidad de fortalecer las estrategias de vigilancia ambiental y de salud ocupacional en el sector ladrillero artesanal, así como de promover procesos de transición tecnológica hacia sistemas de producción más limpios y eficientes. Asimismo, resalta la importancia de incorporar una perspectiva territorial y de justicia ambiental en el diseño de políticas públicas orientadas no sólo a la reducción de emisiones contaminantes, sino también a la protección de la salud de las poblaciones que sostienen, desde la informalidad, actividades económicas funcionales a los procesos contemporáneos de urbanización.

Conclusiones

La producción artesanal de ladrillo en el municipio de Tlajomulco de Zúñiga genera concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ que exceden ampliamente los límites permisibles nacionales e internacionales de calidad del aire, particularmente en las zonas de fabricación y horneado, lo que evidencia un impacto ambiental significativo asociado a esta actividad productiva. Estas condiciones confirman que la industria ladrillera artesanal constituye una fuente importante de contaminación atmosférica en territorios periurbanos.

En el componente de salud, aunque la mayoría de los trabajadores evaluados presentó una función pulmonar dentro de los parámetros normales, se identificó una proporción de patrones obstructivos y una asociación negativa entre los años de exposición laboral y la relación FEV₁/FVC, lo que sugiere un posible efecto acumulativo de la exposición crónica a contaminantes atmosféricos sobre la función pulmonar. La ausencia de diferencias significativas entre etapas específicas del proceso productivo refuerza la noción de una exposición ambiental generalizada dentro del entorno laboral, más que de riesgos diferenciados por actividad.

En términos socioterritoriales, los hallazgos del estudio muestran como una actividad productiva informal, ubicada en la periferia urbana, puede generar niveles extremos de degradación ambiental sin que sus efectos en salud se manifiesten de forma inmediata o plenamente visible a través de indicadores clínicos

convencionales. Esta situación revela formas de vulnerabilidad estructural asociadas a la producción del espacio urbano, donde la exposición ambiental, la informalidad laboral y la limitada vigilancia sanitaria convergen, desplazando los riesgos ambientales y de salud hacia poblaciones trabajadoras y comunidades periurbanas.

Referencias

Benítez-Pérez R.E., Torre-Bouscoulet L., Villca-Alá N., et al. (2016). Espirometría: recomendaciones y procedimiento. *Neumología y Cirugía de Tórax*, 75(2), 173–190.

Berumen-Rodríguez A.A., Pérez-Vázquez F.J., Díaz-Barriga F., Márquez-Mireles L.E., Flores-Ramírez R. (2021). Revisión del impacto del sector ladrillero sobre el ambiente y la salud humana en México. *Salud Pública de México*, 63(1), 100–108.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2016). Análisis de mercado del sector de la construcción y proyecto piloto a nivel región, basado en un portafolio de políticas públicas, con el objetivo de reducir los contaminantes climáticos de vida corta (CCVC), de las ladrilleras artesanales en México. SEMARNAT.

https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/252837/Final_report_pub_final_290817.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2024). Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE).

<https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denu/e/>

León Madariaga, P., Vidal Flores, F., Rodríguez Márquez, T., Castro Jiménez, A., Arrazola Cortés, I., García Carlo, Á., Martínez Oliveira, S., Hernández Jiménez, R., & Castro Díaz, M. (s.f.). Estudio de la cadena de valor del sector ladrillero del Estado de Jalisco. Centro de Investigaciones Económicas y Sociales, Unidad Académica de Ciencias Sociales, Económicas y Administrativas, Universidad Autónoma de Guadalajara. <https://transparencia.info.jalisco.gob.mx/sites/default/files/2016.%20Estudio%20de%20la%20Cadena%20de%20Valor%20del%20Sector.pdf>

Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto a las partículas suspendidas PM10 y PM2.5. Valores normados para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. DOF - Diario Oficial de la Federación.

Organización Mundial de la Salud (2006). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre Actualización mundial 2005. Who.int.

https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf