

Ladrillos verdes: monitoreo y reducción de las emisiones atmosféricas en hornos de ladrillo

Green bricks: monitoring and reduction of atmospheric emissions in brick kilns

Jorge del Real-Olvera^{1*}, Sergio Alonso-Romero², Leonel Hernández-Mena¹, José Eduardo Frías-Chimal²

¹ Unidad de Tecnología Ambiental, Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Guadalajara, Jalisco, México.

² Dirección de Soluciones Tecnológicas, Centro de Innovación Aplicada en Tecnologías Competitivas, León, Guanajuato, México.

* Autor de correspondencia: jdelreal@ciatej.mx

Palabras clave:

emisiones atmosféricas,
ladrillo artesanal, hornos MK,
control de emisiones

Keywords:

atmospheric emissions, artisanal
brick, MK kilns, emission control

Resumen

La producción de ladrillo en México es un pilar económico-cultural que genera impactos ambientales y de salud por las emisiones atmosféricas. Para evaluar alternativas de mitigación, este proyecto cuantificó y comparó los gases contaminantes (CO , CO_2 , NO_2 y SO_2) generados durante la cocción en dos tipos de horno: Paredes Fijas (PF) y MK, integrando el monitoreo en campo y el modelado teórico. Adicionalmente, se evaluó la eficiencia de un lavador de gases en las chimeneas. Los resultados indicaron que, sin lavador, el horno PF es más eficiente por pieza elaborada y alcanza mayor calidad comercial, aunque sus emisiones cuadruplican las del modelo MK. Al activar el lavador del horno MK, se observó una mayor remoción de CO (36%), NO_2 (22%) y CO_2 (26%), sin efecto aparente sobre SO_2 . La optimización energética y el lavado de gases disminuyen los riesgos para la salud y ofrecen una ruta sustentable para este sector.

Abstract

Brick production in Mexico is an economic and cultural pillar that generates environmental and health impacts due to atmospheric emissions. To evaluate mitigation alternatives, this project quantified and compared the polluting gases (CO , CO_2 , NO_2 , and SO_2) generated during firing in two types of kilns: Fixed Walls (PF) and MK, integrating field monitoring and theoretical modeling. Additionally, the efficiency of a flue gas scrubber was evaluated. The results indicated that, without the scrubber, the PF kiln is more efficient per brick produced and achieves higher commercial quality, although its emissions are four times higher than those of the MK model. Activating the scrubber in the MK kiln resulted in greater removal of CO (36%), NO_2 (22%), and CO_2 (26%), with no apparent effect on SO_2 . Energy optimization and flue gas scrubbing reduce health risks and offer a sustainable path for this sector.

Recibido: 18 de mayo 2026
Revisado: 29 de junio 2026
Aceptado: 01 de julio 2026
Publicado: 01 de agosto 2026



Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia CC BY-NC-SA 4.0. Para ver una copia de esta licencia visite <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Introducción

En las últimas décadas, el crecimiento de las zonas urbanas y la actividad industrial han deteriorado la calidad del aire en diversas regiones del país, poniendo bajo la lupa al transporte y algunos sectores industriales. Para enfrentar este reto económico-ambiental, se han diseñado normativas que actúan como un escudo al establecer límites a la emisión de contaminantes atmosféricos. Dentro de este marco regulatorio, el funcionamiento de los hornos ladrilleros ha adquirido gran relevancia científica debido al profundo impacto socioeconómico y ambiental, lo que ha atraído el interés de la comunidad científica para resolver dicha problemática, la cual se ha estudiado ampliamente tanto en México como en otros países en desarrollo de Asia y América Latina. Más allá de las implicaciones climáticas globales, esta actividad económica plantea una dimensión crítica de salud pública a nivel local. El uso arraigado de hornos artesanales que emplean combustibles tan heterogéneos como residuos de madera y aserrín, así como desechos industriales, libera una compleja mezcla de emisiones gaseosas y de material particulado que expone directamente a los operarios y a las poblaciones circundantes (Lara-Mireles et al., 2021). En relación con esto, diversos reportes epidemiológicos recientes en zonas ladrilleras asocian dicha exposición con una alta incidencia de afecciones oculares, padecimientos respiratorios crónicos y síntomas neurotóxicos en grupos vulnerables, lo que evidencia la urgencia de transitar hacia esquemas de producción más limpios (Pedroza et al., 2025).

Contradictoriamente, frente a este escenario de riesgo ambiental y sanitario, el sector ladrillero se mantiene como un pilar económico y cultural indispensable para numerosas comunidades mexicanas. No obstante, sus métodos de fabricación han permanecido prácticamente inalterados durante generaciones. Estudios realizados en entidades con alta producción ladrillera, como Jalisco, Puebla y Guanajuato, confirman que estos procesos tradicionales aportan volúmenes considerables de contaminantes a los inventarios de emisiones regionales (Alonso et al., 2024). Como se observa en la Figura 1, en la distribución geográfica de esta actividad se destaca una concentración crítica en el centro del país, lo que acentúa la necesidad de evaluar alternativas tecnológicas para mitigar los contaminantes atmosféricos (INEGI, 2025).

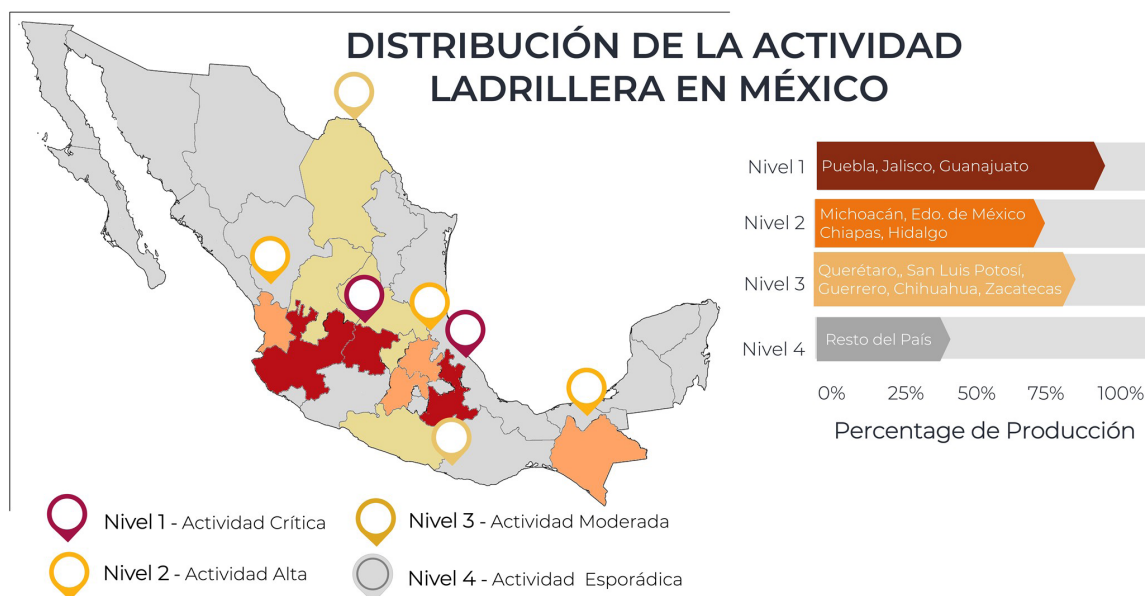


Figura 1. Distribución de la actividad ladrillera en México y el porcentaje de producción
Fuente: Elaboración propia con datos del INEGI (2025)

Diversos reportes científicos han documentado que la eficiencia energética en los hornos ladrilleros depende directamente de la metodología de alimentación del combustible, del tipo de horno y del tipo de biomasa utilizada. Con el fin de estandarizar las evaluaciones realizadas en los diversos tipos de hornos ladrilleros, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) ha propuesto dos variables teóricas que permiten comparar y calcular la cantidad de contaminación generada por tonelada de combustible utilizado; dichas variables son: el factor de emisión (FE) y el contenido de carbono (CC). En términos generales, el contenido de carbono es el porcentaje de carbono puro presente en la biomasa utilizada (como leña o aserrín), lo que determina el potencial máximo de gas que puede liberarse al oxidarse. Por otra parte, el factor de emisión es un coeficiente de referencia que cuantifica la masa promedio de un contaminante específico (por ejemplo, CO_2) que es liberada a la atmósfera por unidad de combustible quemado. Para evaluar ambos parámetros en campo, la variable operativa fundamental a registrar es la masa total del combustible consumido durante el proceso de cocción. Al tratarse de valores teóricos estandarizados, estos indicadores no reflejan fielmente las particularidades del día a día en campo. Por ello, estudios científicos sugieren que minimizar el impacto real no solo consiste en cambiar el material que se quema, sino también en optimizar factores dinámicos del proceso, como el flujo de aire, el acomodo estratégico de los ladrillos sin cocer y el uso de lavadores de gas (INECC, 2016).

Actualmente, el panorama de la producción de ladrillo en México se compone de diversas tecnologías de cocción. Los principales tipos de hornos utilizados en

nuestro país son los tradicionales de campaña (22%), donde los mismos ladrillos sin cocer se acomodan para formar la propia estructura del horno; los hornos de paredes fijas (PF) (75%), con estructura y diseño permanentes, donde se ubica de manera estable la cámara de cocción; y el modelo MK (0.5%) (nombrado así por las iniciales de sus inventores, Ing. Roberto Márquez y el técnico Ricardo Kruse en los años 90), creado en respuesta a las limitaciones operativas y a la alta contaminación de los métodos artesanales. En este modelo, la cámara de cocción del horno se cubre con una cúpula superior fija y, a través de ella, se canaliza el flujo de salida de los gases calientes de combustión hacia una segunda cámara de cocción precargada con ladrillo crudo, logrando así el aprovechamiento del calor y originando una filtración inicial de las emisiones (Ramos-Vargas et al., 2026). Esta alternativa tecnológica demostró que, con el aprovechamiento del calor de los gases emanados, era posible reducir el consumo de combustibles entre un 30 y un 50%. Una de sus mayores ventajas técnicas es que, a diferencia del esquema convencional de paredes fijas, el MK facilita la integración y el acoplamiento directo de sistemas de lavado de gases en su salida. La evidencia recopilada en proyectos similares indica que la transición hacia estos sistemas más eficientes puede reducir drásticamente las emisiones de contaminantes atmosféricos, lo que demuestra que es posible equilibrar una actividad productiva ancestral con las exigencias ambientales del siglo XXI (Alonso et al., 2025).

Antecedentes históricos de investigación

El desarrollo de este proyecto se alineó directamente con la evolución histórica y la maduración científica de la Unidad de Tecnología Ambiental (UTA) del CIATEJ. A lo largo de su trayectoria, la UTA se ha fortalecido con una sólida reputación en el diseño de soluciones tecnológicas enfocadas en prevenir, reducir y controlar la contaminación atmosférica en el occidente y el centro de México. Lo que inicialmente comenzó como un esfuerzo centrado en la evaluación de impactos ambientales ha evolucionado hacia la investigación aplicada, en la que la mitigación de emisiones atmosféricas y la optimización energética juegan un papel prioritario para cumplir las metas de desarrollo sostenible propuestas para la institución. Históricamente, la UTA ha ampliado sus capacidades analíticas desde el tratamiento biológico de residuos y el monitoreo de la calidad del agua hasta el estudio de la calidad del aire y de la salud socioambiental.

Por otro lado, este proyecto robusteció la trayectoria tecnológica del Centro al abordar la problemática ambiental del sector ladrillero, una actividad de arraigo cultural y económico crítica en estados como Jalisco y Guanajuato, que presenta

un importante rezago tecnológico. La pertinencia del proyecto dentro de la agenda del CIATEJ generó el fortalecimiento de las relaciones con otras instituciones de investigación como el CIATEC, INECC y la UdG, evaluando cómo la eficiencia de los quemadores, el lavado de gases y el reacomodo de la carga en hornos disminuyen la contaminación atmosférica, no solo aportando patentes o literatura científica, sino generando conocimiento transferible que impacta de forma directa en las políticas públicas y la reducción de riesgos neurotóxicos y respiratorios en las comunidades vulnerables. De este modo, aquí se muestra un claro ejemplo del principio rector del CIATEJ en su medio siglo de vida, transitando de la ciencia básica hacia una tecnología de alto valor social, demostrando que es viable mitigar la huella del cambio climático global sin desarticular la economía de los sectores productivos más tradicionales del país.

Por todo lo anterior, el objetivo del proyecto fue monitorear y cuantificar las emisiones atmosféricas producidas en dos tipos de hornos: Paredes Fijas (PF) y MK, utilizados en la cocción de ladrillo en el estado de Guanajuato, evaluando alternativas de mitigación mediante sistemas lavadores de gases, empleando metodologías de medición directa *in situ* y evaluaciones teóricas empleando las variables (FE) y (CC) y utilizando la eficiencia energética como punto de comparación.

Materiales y Métodos

De acuerdo con el recurso económico solicitado a la Secretaría de Energía, se realizó el monitoreo *in situ* de 10 ciclos de cocción (5 en MK y 5 en PF) en las comunidades de León y Acámbaro, en el estado de Guanajuato. Las emisiones atmosféricas de CO, CO₂, NO₂ y SO₂ fueron cuantificadas mediante dos analizadores portátiles de gases marca Testo, modelo 340 (TESTO SE & Co.), colocados en la chimenea de los hornos y conectados a laptops para la adquisición de datos en línea. Se realizó la medición directa de los gases por 3 min continuos cada 15 min, a lo largo de todo el ciclo de cocción, el cual varió entre 12 h (MK) y 16 h (PF), según el método productivo del operador del horno. En todo momento se procuró no interferir ni modificar las prácticas habituales de cocción de los operadores, sino reproducir fielmente las condiciones de quema tradicionales para obtener un esquema real del proceso.

Para reducir las emisiones atmosféricas y el material particulado generado en la cocción, se diseñó y colocó un sistema lavador de gases en la parte alta de la chimenea de ambos tipos de hornos, en los cuales se utilizó agua potable como medio de absorción de los contaminantes. La recirculación de agua desde un tambo de 200 L se realizó empleando una bomba de ¼ de caballo colocada en la parte inferior del horno y se operó permanentemente mientras se realizaba la alimentación de

biomasa a la cámara de cocción; no obstante, el efecto positivo del lavador de gases se reduce cuando se calienta el agua al entrar en contacto con los contaminantes gaseosos (200-300 °C) generando la desorción prematura de contaminantes y limitando la efectividad del sistema solo a las primeras horas de quema; además de la evaporación natural del líquido al calentarse. Para evaluar la eficiencia del lavador, se cuantificaron las emisiones antes y después del sistema, para calcular el porcentaje de remoción de los diferentes gases y del material particulado.

La determinación teórica del impacto ambiental de las emisiones atmosféricas se basó en el cálculo de los factores de emisión (FE) y del contenido de carbono (CC) del combustible utilizado (leña y aserrín de madera), según la literatura recomendada. Al integrar datos oficiales y estandarizados con la cantidad precisa de combustible consumido en cada quema, es posible estimar el volumen de emisiones atmosféricas liberadas. Los valores numéricos de FE y CC se tomaron de reportes oficiales publicados en la literatura (INECC, 2016). Una de las ventajas de emplear esta metodología para la estimación teórica de las emisiones es que solo se requiere conocer la cantidad de combustible consumido durante todo el proceso de cocción. Este método de cálculo proporciona un valor aproximado de la huella de carbono del proceso, lo que permite monitorear la actividad productiva y evaluar la eficiencia del horno para garantizar el cumplimiento de las normativas ambientales vigentes.

Resultados y Discusión

Los resultados mostraron diferencias importantes entre ambos tipos de hornos, asociadas principalmente al diseño y la operación de los mismos, así como a la cantidad de biomasa utilizada durante la cocción.

Muestreo de campo

En el caso del horno MK, se observó un comportamiento más estable y eficiente en el proceso de combustión, lo que se reflejó en una menor generación de contaminantes atmosféricos y en una mejor distribución térmica dentro del horno. Por otra parte, el horno PF presentó importantes variaciones en la emisión de gases, asociadas a un descontrol del proceso de combustión y a la pérdida de calor debida a su configuración estructural. Los resultados indican que, si se comparan ambos hornos con la misma cantidad de ladrillos y peso de combustible, el horno PF emite en promedio cuatro veces más gases totales que el MK, como se puede observar en la Figura 2, aunque al final produjo hasta 2.2 veces más ladrillos bajo norma por ciclo de cocción.

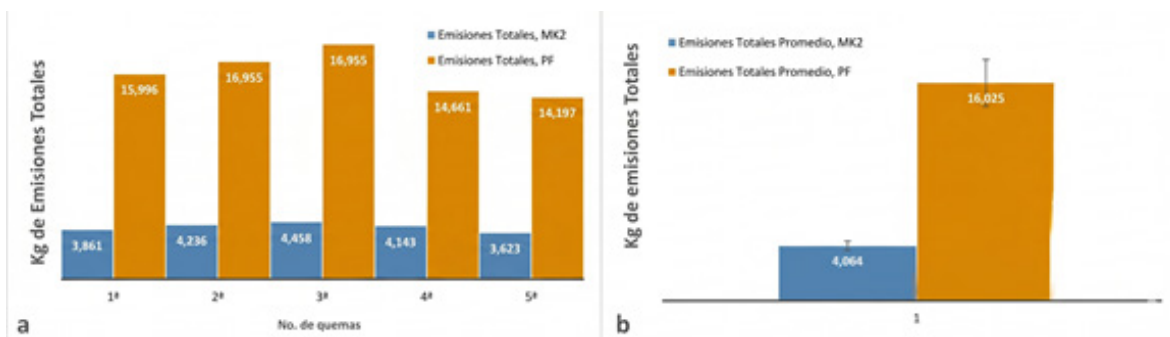


Figura 2. a) Variación de las emisiones en las diferentes quemas de los hornos MK y PF; b) Promedios de las emisiones de ambos tipos de hornos en las cinco quemas
Fuente: propia con resultados parciales del proyecto 234633

La Figura 2a muestra la variación de las emisiones generadas en las cinco quemas independientes de cada tipo de horno analizado. En el caso del horno MK, la cantidad total de emisiones osciló entre 3,600 y 4,400 kg, mientras que para el horno de PF la variación estuvo entre 14,200 y 18,300 kg. Los resultados de campo muestran un ligero descenso en la cantidad total de emisiones, en particular durante las quemas 4 y 5 del horno de PF y la quema 5 del horno MK. En la Figura 2b se observa el valor promedio global de las emisiones generadas durante las quemas analizadas en el proyecto para ambos tipos de hornos.

En cuanto a los gases, el CO fue el contaminante atmosférico con mayor variabilidad en ambos hornos, ya que sus emisiones están estrechamente relacionadas con la eficiencia de combustión y la disponibilidad de oxígeno durante el proceso de cocción. Las concentraciones registradas evidenciaron condiciones de combustión deficiente o de consumo incompleto del material, particularmente durante las horas iniciales de operación y en la etapa final de cocción, cuando la experiencia de los operadores indicó que ya no se requería una mayor cantidad de combustible. La generación de dióxido de carbono (CO_2) representó el 95% de las emisiones totales y fue la principal fracción gaseosa emitida, debido a la oxidación del carbono contenido en la biomasa utilizada como combustible. Por otro lado, los demás contaminantes atmosféricos cuantificados en campo, como el CO (4%), el NO_2 y el SO_2 , fueron minoritarios (<0.1%).

En relación con los óxidos de nitrógeno y azufre (NO_2 y SO_2), las emisiones estimadas fueron menores que las de CO y CO_2 ; sin embargo, su presencia está asociada a las características del combustible y a las condiciones de temperatura alcanzadas en el horno de cocción. La generación de NO_2 estuvo influida principalmente por las altas temperaturas de combustión y el contenido de nitrógeno de la biomasa, mientras que las emisiones de SO_2 dependieron del contenido de azufre de la madera y del aserrín empleados, ya que ninguno de los combustibles empleados contenía pintura ni tratamiento químico alguno.

Modelado teórico

La comparación entre las estimaciones basadas en factores de emisión (FE) y los datos de monitoreo en campo permitió identificar diferencias entre los valores teóricos y las emisiones reales observadas en condiciones de operación. Esto evidenció la importancia de complementar el uso de factores de emisión con mediciones directas, particularmente en procesos artesanales donde las condiciones de operación pueden variar considerablemente entre hornos y ciclos de producción.

Como ejemplo de aplicación, los resultados de las comparaciones del monitoreo 3 del MK y de los FE se muestran en la Tabla 1. Las emisiones totales (e individuales por gas) estimadas para el FE pueden considerarse un valor de referencia con base en la cantidad de combustible empleado, sin considerar factores propios y particularidades de la operación del horno, que influyen directamente en la cantidad de emisiones generadas y en la proporción de los gases más importantes.

En términos generales, todas las especies de gases cuantificadas con los equipos de monitoreo (excepto el SO_2) mostraron una reducción en las cantidades emitidas. Por ejemplo, las emisiones totales determinadas en este monitoreo fueron un 13% menores que las estimadas teóricamente para el FE. Esta disminución porcentual estuvo dominada por el descenso de la cantidad de CO_2 . Estos resultados sugieren que el reacomodo de los ladrillos sin quemar y los cambios sugeridos en la alimentación de combustible durante el proceso de cocción de los ladrillos artesanales en el monitoreo 3 del horno MK tuvieron un efecto positivo en la reducción de las emisiones esperadas.

Tabla 1. Comparación de las emisiones por FE y del monitoreo 3 del horno MK

Gas emitido	Emisiones (Kg)	
	FE	Monitoreo
CO_2	3,433.05	3,007.42
CO	187.38	124.93
SO_2	0.30	3.09
NO_2	1.93	1.48
Emisiones totales	3,622.65	3,136.93

Uso de lavador de gases

El monitoreo de las emisiones de gases durante la operación de dos quemas en el horno MK, con el funcionamiento del lavador de gases que empleó agua como medio de transporte para la precipitación de partículas y la absorción de gases, se muestra en la

Figura 3. El monitoreo de las emisiones se realizó durante el tiempo en que el lavador de gases estuvo en funcionamiento (8 h), de acuerdo con las prácticas del operador del horno. Para comprobar la eficiencia de la remoción de gases contaminantes en el horno, se colocaron dos sondas de análisis de gases, una antes y otra después del lavador, operando simultáneamente. La cuantificación de las concentraciones permitió estimar la capacidad de remoción de gases del lavador utilizado.

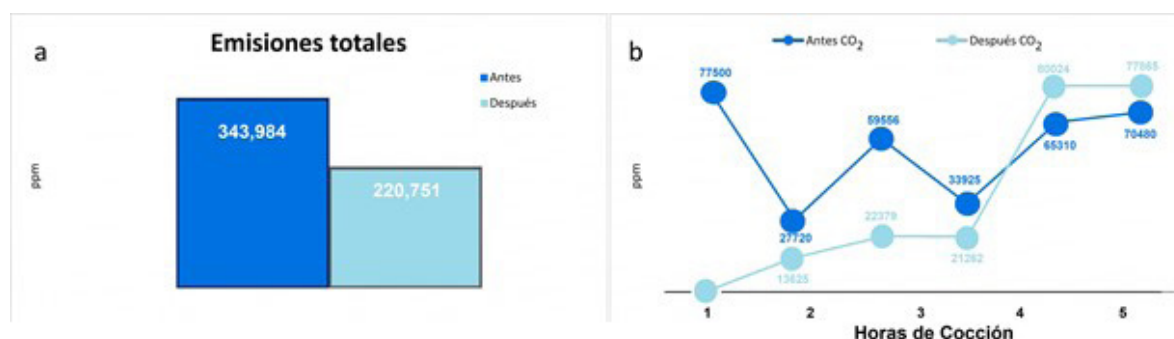


Figura 3. a) Emisiones totales antes y después del lavador de gases en el horno MK; b) Variación del CO₂ por hora durante el proceso de cocción de ladrillo empleando un lavador de gases

Fuente: propia con resultados parciales del proyecto 234633

Como se puede observar, las emisiones totales alcanzaron 343,984 ppm antes del lavador y descendieron a 220,751 ppm después del lavador. La diferencia equivale a un 36% menos de emisiones. De estas, el CO₂ es el de mayor contribución (entre 95 y 99%), por lo que el efecto de la remoción de gases incide prácticamente en esta especie.

En el caso del horno de PF, el lavador de gases funcionó durante 4 h continuas desde el inicio de la cocción. El diseño del lavador consideró el confinamiento de todas las emisiones, por lo que se emplearon dos sondas de detección, una antes y otra después del lavador de gases, para su monitoreo. En este proceso de cocción, las emisiones totales reportadas fueron de 716,605 ppm antes del lavador, mientras que después de este descendieron a 380,311 ppm, lo que equivale a una reducción del 47%, como se observa en la Figura 4a. En el caso particular del CO₂, como el gas más abundante, la Figura 4b permite apreciar su variabilidad. En general, la principal reducción de este gas se observó entre las 3 y las 4 h de monitoreo. Al igual que en el caso del MK, a mayor tiempo transcurrido en el proceso, menor es la remoción del CO₂ debido al incremento de la temperatura del agua de lavado, lo que afecta la adsorción del gas en el medio líquido.

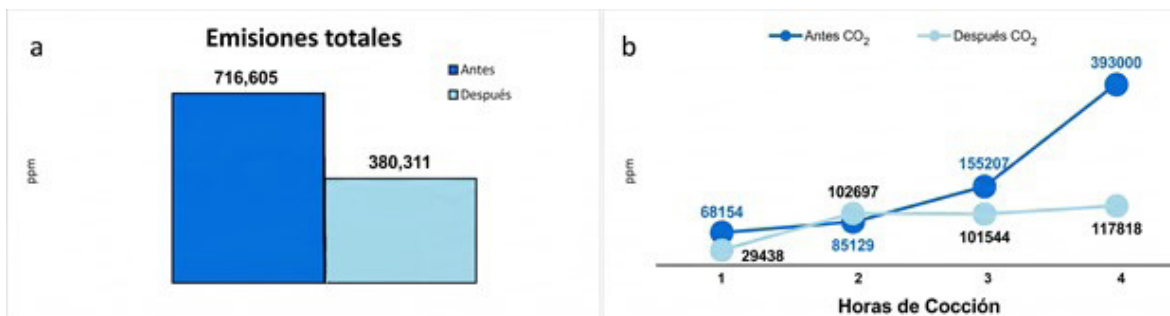


Figura 4. a) Emisiones totales antes y después del lavador de gases en el horno PF; b) Variación del CO₂ por hora durante el proceso de cocción de ladrillo empleando un lavador de gases

Fuente: propia con resultados parciales del proyecto 234633

Conclusiones

Los resultados sugieren que la huella de carbono en la producción de ladrillo artesanal depende no solo del tipo de horno, sino también de la relación entre la cantidad de piezas producidas y la calidad del combustible utilizado. Aunque los hornos PF generan mayores emisiones totales, optimizan las emisiones por unidad de ladrillo, lo cual resulta aceptable para el mercado y permite cumplir mejor con la norma. La introducción de lavadores de gases constituye una estrategia viable y replicable para reducir el impacto ambiental y proteger la salud de los operadores, especialmente ante la alta vulnerabilidad de las poblaciones expuestas. Sin embargo, la variabilidad en el manejo de los hornos, debido a las diferentes formas de trabajar de los operadores, y la falta de control de parámetros como la temperatura y la aireación, limitan la efectividad de estas tecnologías, lo que requiere capacitación y adaptación a las condiciones locales. Los principales puntos encontrados al final del proyecto son enumerados a continuación:

- El monitoreo y la cuantificación de emisiones en los hornos tradicionales evidencian la importancia de adecuar las tecnologías de control y los procesos de combustión para reducir el impacto ambiental y la huella de carbono en la producción de ladrillo.
- El horno PF, pese a emitir más contaminantes en términos absolutos, es más eficiente si se considera la cantidad de ladrillos de calidad producidos.
- La implementación de lavadores de gases y mejoras en el acomodo de los ladrillos crudos reduce significativamente las emisiones de CO y de CO₂.
- Es fundamental promover regulaciones, capacitaciones y apoyos para la adopción de prácticas más limpias en el sector ladrillero artesanal.
- El trabajo representa un avance hacia una producción más sostenible y la protección de la salud comunitaria en Guanajuato y en regiones similares.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que la investigación se realizó en ausencia de cualquier relación comercial o financiera que pudiera interpretarse como un potencial conflicto de interés.

Financiamiento

El proyecto fue financiado por el CONACYT en la Convocatoria S0019-2013-05 del Fondo de Sustentabilidad Energética en su tercer corte trimestral, con el proyecto denominado “Optimización energética numérico-experimental del proceso de cocción de ladrillo rojo tradicional”, solicitud 234633, donde el líder del proyecto fue el Dr. Sergio Alonso Romero, investigador del CIATEC y se invitó a CIATEJ, a través del Dr. Jorge del Real Olvera, para participar como colaborador para que desarrollara un eje del proyecto que se denominó “Monitoreo y cuantificación de las emisiones a la atmosfera generadas en la operación de hornos del proceso de cocción de ladrillo rojo tradicional”.

Referencias

- Alonso Romero, S., Ángel Ortiz Lango, L., Eduardo Frías Chimal, J., Zitzumbo Guzmán, R., Estrada Monje, A., Hernández Mena, L., del Real-Olvera, J. (2024). Compression Resistance and Color Evaluation in Artisanal Red Bricks: Experimental Study and Numerical Simulation. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*, 36(7), 446–454. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2023.10.002>
- Alonso-Romero, S., Alfaro-Ayala, J.A., Frias-Chimal, J.E., López-Núñez, O.A., Ramírez-Minguela, J.d.J., Zitzumbo-Guzmán, R. (2025). A Transient Combustion Study in a Brick Kiln Using Natural Gas as Fuel by Means of CFD. *Processes*, 13(8), 2437. <https://doi.org/10.3390/pr13082437>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2016). *Regional Level Market Analysis of the Construction Sector and Pilot Project Based On a Public Policy Portfolio in Order to Reduce SLCP of Traditional Brickyards in Mexico. Final Report*. National Institute of Ecology and Climate Change (INECC), https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/252837/Final_report_pub_final_290817.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2025). *Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE): Fabricación de productos de arcilla y albañilería (Código SCLAN 327121)*. <https://www.inegi.org.mx/app/mapa/denue/>
- Lara-Mireles, J., Alonso-Romero, S., Frías-Chimal, E., Zitzumbo-Guzmán, R., del Real-Olvera, J., Hernández-Mena, L. (2021). Analysis of the MK brick kiln thermal behavior. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 20(1), 289-304. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Fen1749>

- Pedroza Carrillo, P.K., Salazar-Gómez, A., Jiménez Alcalá, A.M., Nilo Olmos, D.R., Pérez Pérez, B., Rocha Villa, V.G., Martínez-Rodríguez, A.L., Thébault, S.C., Hernández-Zimbrón, L.F. (2025). Human exposure to pollutant emissions from brick kilns and their association with ocular health and neurotoxic symptoms: a pilot study in the Refugio Brickmaking Area, León, Mexico. *Frontiers in Psychiatry*, 16, 1554101. <https://doi.org/10.3389/fpsyt.2025.1554101>
- Ramos-Vargas, S., Vázquez-Tinoco, J.C., Serrano-Medrano, M., Masera, O., Ruiz-García, V.M. (2026). Participatory innovation for sustainable artisanal brick production in Mexico: A case study. *Sustainable Futures*, 11, 101697. <https://doi.org/10.1016/j.sftr.2026.101697>