

Uso Del Modelo AERMOD para la estimación de la dispersión de material particulado proveniente de la industria ladrillera en la Zona Metropolitana De Oaxaca

Using AERMOD Model to estimate particulate matter dispersion from traditional brick links production in Oaxaca Metropolitan Area

Alan Fernando Mateos Zarate¹, Sandy-Edith Benitez García^{2*}, Francisco Hernandez-Ortega³, Abraham Ortiz-Alvarez⁴. DOI: 10.56643/rcia.v2i1.163

*Autor de correspondencia

Resumen

En la Zona Metropolitana de Oaxaca (ZMO), así como en otras áreas del país, se ha identificado la presencia de hornos ladrilleros que operan sin un sistema adecuado de control de emisiones y emplean diversos combustibles que contribuyen a generar altas concentraciones de contaminantes, como monóxido de carbono y material particulado. La falta de un adecuado sistema de monitoreo atmosférico conduce a la escasez de conocimiento con fundamento científico y técnico que permita la toma de decisiones que contribuyan a la adecuada solución de la problemática planteada. Para el desarrollo del presente estudio se realizó de un censo de ladrilleras artesanales en la ZMO, identificando coordenadas geográficas, dimensiones, horarios y combustibles utilizados en las quemas; luego se seleccionaron siete hornos representativos y distribuidos estratégicamente. Además, se estimaron las emisiones del material particulado considerando aquellos aplicativos de la compilación AP-42.

¹ Licenciado en Ingeniería Ambiental. Universidad la Salle Oaxaca, Escuela de Ingenierías y Arquitectura, Grupo de Investigación Desarrollo e Innovación de aplicaciones STEAM, México/Coordinación de seguridad y protección ambiental de Gas de Oaxaca. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6655-5205>

² Doctora en Ciencias e Ingeniería Ambiental. Universidad la Salle Oaxaca, Escuela de Ingenierías y Arquitectura, Grupo de Investigación Desarrollo e Innovación de aplicaciones STEAM, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0067-6046>. Correo electrónico: sandy.benitezgarcia@gmail.com

³ Maestro en Ingeniería. Subdirector de Modelación en la Coordinación General de Salud Ambiental del INECC, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0145-9016>

⁴ Doctor en Ciencias. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, Coordinador General de Mitigación del Cambio Climático, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6465-3997>

Recibido: 31/10/2022 | Aceptado: 24/03/23 | Publicado: 31/05/2023

Los datos meteorológicos analizados corresponden al 1° de diciembre de 2016, en un horario entre las 06 y 18 UTC, generados a través del modelo Weather Research and Forecasting (WRF) con una variación de la malla de dispersión de 20 metros hasta cinco kilómetros. Los datos fueron procesados en el Mesoscale Model Interface Program (MMIF), para continuar su tratamiento en el AMS/EPA Regulatory Model (AERMOD). Una vez obtenidas las salidas de la modelación, se realizó la visualización con ayuda de los sistemas de información geográfica, logrando identificar las dimensiones de la dispersión del material particulado, así como las posibles áreas impactadas y los sitios en los que se detectan altas concentraciones.

Palabras clave: Industria ladrillera, AERMOD, material particulado, modelos de simulación numérica.

Abstract

In the Oaxaca Metropolitan Area (ZMO), as well as other metropolitan areas of the country, the presence of traditional brick kilns without emission control systems and a variety of fuels employed as energy sources for brick firing have been notorious through the last decades. The above promotes high concentrations of pollutants such as carbon monoxide and particulate matter. On the same way, a lack of atmospheric monitoring systems with an adequate quality control of information leads to a lack of knowledge with scientific and technical support for decision makers that contributes to planning solutions. In the present work a special census was taken in the ZMO, among others it was identified: geographical coordinates of traditional brick kilns, dimensions, periods of work and fuel used. Seven representative brick kilns were selected, due to their locations in the study area, to estimate the emissions of particulate matter considering those from AP-42 compilations. Meteorological data used were from December 1st 2016, from 06 to 18 UTC and generated through the Weather Research and Forecasting Model (WRF) considered a grid dispersion from 20 m up to 5 km. Data were processed in the Mesoscale Model Interface Program (MMIF) to continue processing with AMS/EPA Regulatory Model (AERMOD). Once the modeling results were obtained, the visualization was done by geographic information system to identify the particulate matter dispersion as well as the potential impacted areas and those sites with significant high concentrations.

Keywords: traditional brick kilns, AERMOD, particulate matter, numerical simulation models.

Cómo citar este artículo: Mateos-Zárate, A. F., Benítez-García, S.-E., Hernández-Ortega, F., & Ortíz-Alvarez, A. (2024). Uso Del Modelo AERMOD para la estimación de la dispersión de material particulado proveniente de la industria ladrillera en la Zona Metropolitana De Oaxaca. *Revista Científica de Ingenierías y Arquitectura*. 2(1). 29-48. DOI: <https://doi.org/10.56643/rcia.v2i1.163>

Introducción

La mala calidad del aire ocasionada por una gran diversidad de Notas antropogénicas constituye una problemática importante a nivel nacional y mundial, tanto desde el punto de vista medioambiental como de salud pública; además, es de las problemáticas más difíciles de vislumbrar, valorar, regular y controlar a través de normas. De acuerdo con INECC y Semarnat (2018), ello responde a la gran cantidad y diversidad de Notas de emisión, la química atmosférica y los efectos de los gases y partículas contaminantes en la salud del ser humano y los ecosistemas. La Organización Mundial de la Salud (2022) estima que 99% de la población a nivel global respira un aire cuya calidad es deficiente, con una concentración de partículas contaminantes por encima de los límites máximos permisibles, lo cual hace que la salud de los pobladores se encuentre en riesgo. Se estima que cada año se producen 4.2 millones de muertes prematuras debido a la exposición a material particulado menor o igual a 2.5 micrones (PM_{2.5}), al tiempo que también se producen enfermedades cardiovasculares y respiratorias (OMS, 2018).

En las últimas décadas, las elevadas concentraciones de contaminantes generados y emitidos a la atmósfera por la industria ladrillera en el estado de Oaxaca, han hecho que esta problemática cobrara relevancia (IEEDS, 2013). En 2013, el Instituto Estatal de Ecología y Desarrollo Sustentable (IEEDS) identificó la operación de 147 hornos de fabricación de ladrillo rojo en la zona metropolitana de Oaxaca (ZMO), mismos que registran la siguiente distribución en los municipios de esta zona: San Agustín Yatarién (71 hornos), San Andrés Huayapam (6), San Sebastián Tutla (16), Santa Cruz Amilpas (4), Santa Lucía del Camino (16) y la Agencia de San Francisco Tutla, perteneciente a Santa Lucía del Camino (30). Se constató que dichos hornos carecen de planeación y regulación, como también de un sistema adecuado

de control de emisiones; asimismo, éstos emplean como combustibles residuos sólidos urbanos, por ejemplo, llantas, plásticos, aserrín, madera, etc., los cuales provocan diferentes efectos en la salud como consecuencia de las emisiones generadas, y contribuyen en un 6, 13 y 18% a las emisiones de monóxido de carbono (CO) y material particulado menor o igual a 10 micrómetros (PM₁₀) y PM_{2.5} en la ZMO (Tejeda Le Blanc & Cia., S.C. LT Consulting, 2011).

Aunado a lo anterior, los trabajos de investigación realizados en el estado de Oaxaca para ampliar el conocimiento sobre la dispersión y el impacto de los contaminantes generados por la industria ladrillera artesanal son escasos. Por lo que, la generación de conocimiento que permita la planeación y ejecución de estrategias para la mitigación de los efectos producidos por esta actividad debería ser significativa. El estado de Oaxaca cuenta solamente con dos estaciones de monitoreo de la calidad del aire, identificadas como Casa Hogar y CEDART, las cuales se encuentran ubicadas en el municipio de Oaxaca de Juárez. Debido a su ubicación (a aproximadamente cinco a seis kilómetros de la zona de estudio) y desempeño (INECC y Semarnat, 2018), dichas estaciones resultan insuficientes para monitorear los contaminantes generados y los efectos de las actividades citadas. Como ocurre con otros Sistemas de Monitoreo de la Calidad del Aire (SMCA) existentes en el país, en la ZMO existe déficit de información debido a la falta de operación, mantenimiento y calibración de las estaciones de monitoreo, además de que la validación de los datos no se realiza de manera periódica y sistemática (INECC y Semarnat, 2018). Parte de las irregularidades detectadas responde a los altos costos de mantenimiento de los SMCA, a lo que se suma que todo el proceso de establecimiento de una estación de monitoreo requiere una inversión alta de recursos, tanto económicos como humanos. Ello ha hecho que una gran variedad de áreas en nuestro país haya quedado faltas del conocimiento de los impactos provocados por diversas actividades antropogénicas que generan elevados niveles de emisiones de contaminantes a la atmósfera; tal es el caso del estado de Oaxaca. Debido a lo mencionado anteriormente, algunas metrópolis mexicanas, entre ellas la Ciudad de México, Guadalajara, Monterrey y Guanajuato, han optado por el uso de diversos modelos matemáticos para coadyuvar al estudio y la predicción de las emisiones, así como de los efectos ocasionados por diversas Notas contaminantes, fortaleciendo con esto la gestión de la calidad del aire (Mendoza y García, 2009).

En las últimas décadas se ha desarrollado una gran cantidad de modelos de simulación numérica que permiten llevar a cabo la estimación de las concentraciones de diversos contaminantes arrojados a la atmósfera por una o más Notas de emisión; éstos consideran escenarios variados, además de ciertas restricciones en función de distintas condiciones, como son las meteorológicas, topográficas y las propias de las concentraciones de la Nota. De acuerdo con la United States Environmental Protection Agency, para guiar investigaciones y políticas públicas en Estados Unidos, se utilizan diversos modelos, dado que éstos proveen información extensa que puede impactar diversas decisiones (US-EPA, 2023). Tomando en cuenta la rapidez en la obtención de respuestas, además del factor económico, se prefiere el uso de estos métodos, que pueden ser empleados en zonas donde no existe la posibilidad de realizar monitoreos continuos. Aunado a lo anterior, se han realizados esfuerzos significativos para mejorar el desempeño de los modelos y ampliar su espectro de uso (US-EPA, 2023). Cabe mencionar que, en países como Chile, los modelos de simulación constituyen una herramienta útil para estimar concentraciones de contaminantes atmosféricos y evaluar su impacto en la calidad del aire en diversas fases de los proyectos (construcción, operación y cierre) descritos y sometidos a una evaluación de impacto ambiental (SEA, 2023).

Por lo anterior, en la presente investigación se realiza el análisis de las demandas de *hardware* y de *software* inherentes a la aplicación del modelo AERMOD, que permite estimar la dispersión de los contaminantes atmosféricos (específicamente de material particulado) emitidos por la industria ladrillera en la ZMO, con la finalidad de plantear estrategias a futuro para mitigar los efectos generados por dicha industria.

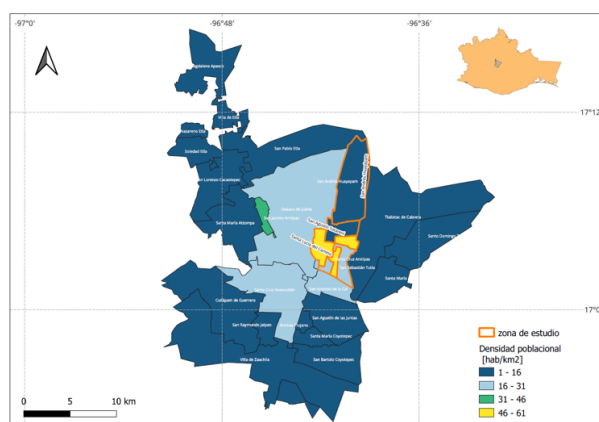
Materiales y métodos

Selección del sitio de estudio

Para seleccionar el sitio de estudio, se realizaron recorridos en campo en cinco municipios y una agencia municipal de la ZMO, con el propósito de identificar los diversos hornos ladrilleros, así como su georreferenciación empleando el programa Google Earth Pro, tomando como base la información descrita por el IEEDS en 2013 y el último inventario realizado en el estado al momento de la realización de la presente investigación por Tejeda Le Blanc & Cia., S. C. LT

Consulting (2011) en San Agustín Yatareni, San Andrés Huayapam, San Sebastián Tutla, Santa Cruz Amilpas, Santa Lucía del Camino y la Agencia de San Francisco Tutla, perteneciente a Santa Lucía del Camino. La zona posee una extensión territorial de 120.39 kilómetros cuadrados, una población total de 90 138 habitantes y el uso de suelo es predominante en zona urbana y asentamientos humanos (INEGI, 2020). En la figura 1 se muestra la organización territorial de la ZMO, así como la delimitación de la zona de estudio.

Figura 1.
Zona Metropolitana de Oaxaca y delimitación del área de estudio



Nota: elaboración propia con datos del Censo Nacional de Población y Vivienda 2020 (INEGI, 2023).

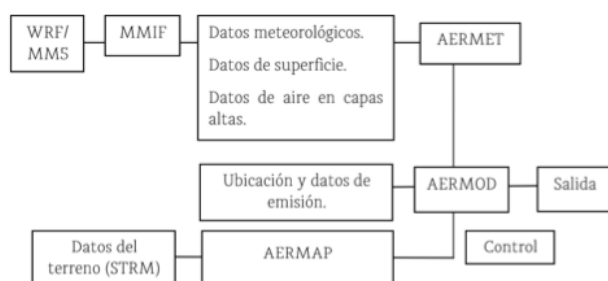
Configuración del modelo

Se aplicó el *software* AERMOD (American Meteorology Society/Environmental Protection Agency Regulatory Model), un modelo de dispersión de penacho gaussiano que considera tanto estados convectivos como estacionarios para Notas puntuales, asumiendo que la dispersión de la concentración tiene una distribución gaussiana horizontal y vertical (EPA, 2003). El modelo se utilizó para llevar a cabo cálculos de las emisiones hacia el aire de sustancias contaminantes procedentes de la actividad industrial de fabricación de ladrillos en la ZMO, dado que los hornos asociados fueron identificados como puntos específicos de emisión de contaminantes. Entre los modelos ampliamente recomendados por la US Environmental Protection Agency desde 2006, encontramos AERMOD; éste trabaja bajo los principios de código abierto y posee un desempeño supe-

rior al de diversos modelos de simulación numérica al ser evaluado con bases de datos experimentales. Además, ha sido creado para correr con un mínimo de parámetros meteorológicos observados (EPA, 2023).

El modelo consta de dos preprocesadores y el modelo de dispersión. El preprocesador de terreno aermap ayuda a caracterizar el sitio de estudio (uso de suelo y suelo), mientras que el preprocesador aermet provee la información meteorológica necesaria para caracterizar la capa límite planetaria. Ambos preprocesadores contribuyen a generar la malla receptora para el modelo receptor aermod. En este último se determina la ubicación de la Nota y los datos de emisión del contaminante, permitiendo la generación de datos de salida, como puede verse en la figura 2. Las corridas del modelo se realizaron en un dispositivo con procesador Intel(R) Core (TM) i7-6560U cpu de 16 GB de ram y Microsoft Windows 10.

Figura 2.
Configuración del modelo AERMOD



Nota: Reproducido de “Evaluación de la aplicación del modelo AERMOD para estimación de contaminantes atmosféricos emitidos por la industria ladrillera en Oaxaca” por Mateos (2023), [Reporte de Investigación, Universidad La Salle Oaxaca]. Repositorio Académico ULSA Oaxaca. Reproducido con permiso del autor.

El preprocesador AERMAP facilita la obtención de las elevaciones, tanto para la malla de interés como para cada una de las Notas emisoras; al mismo tiempo, se determinan estas altitudes mediante el procesamiento de una imagen satelital del STRM3 (Shuttle Radar Topography Mission9), con el objetivo de obtener datos precisos relativos a la altura sobre el nivel del mar. De esta manera se procesaron dos archivos (N16W097.hgt/N17W097.hgt) correspondientes a la ZMO, obtenidos de la base de datos STRM3 en el programa 3DEM a un archivo digital de elevación (.DEM) con una proyección UTM.

Se definieron los datos obtenidos en el ejecutable AERMAP, como también la ubicación del archivo DEM generado, la ubicación geográfica de la zona de estudio (dominio), las coordenadas de los hornos estudiados, la variación de la malla de dispersión (establecida desde 20 metros sobre el nivel de la superficie hasta cinco kilómetros) y el archivo de salida AERMAP.REC utilizado para el módulo AERMOD.

Los datos meteorológicos se obtuvieron del modelo de pronóstico de clima Weather Research and Forecasting (WRF) y se procesaron en Mesoscale Model Interface Program (MMIF) para su utilización en AERMOD. Se obtuvieron dos archivos de salida correspondientes a los datos meteorológicos del 1° de diciembre de 2016 para el dominio de la ZMO, en un periodo entre las 11 y 23 horas tiempo local estándar (TLS), durante el cual se llevaron a cabo procedimientos de cocción del ladrillo de manera convencional en la región de investigación. El periodo de estudio se definió con base en la información meteorológica disponible para su utilización con WRF, además de ser un mes en que se tienen episodios significativos de estabilidad atmosférica, que favorecen la aplicación del modelo.

La configuración del módulo AERMOD se realizó en un archivo (.inp); se definieron las características del contaminante a ser evaluado (material particulado), a saber, vida media (HALFLIFE), tasa de emisión (QS) determinada por factores de emisión del apéndice AP-42 de la US-EPA y las dimensiones de la chimenea del horno ladrillero, obtenidas en los censos en campo, las rutas de entrada obtenidas mediante AERMAP y AERMET, obteniéndose los datos correspondientes para la modelación en el archivo UBICAREC.

Visualización del modelo

Los resultados obtenidos con AERMOD fueron utilizados para crear un archivo que contenía las coordenadas y las concentraciones estimadas para cada hora durante el periodo establecido. Estos archivos se introdujeron en el *software* ArcGIS v.10.4.1 para Sistemas de Información Geográfica, donde fueron procesados mediante la herramienta de interpolación IDW. Este paso permitió visualizar la dispersión de material particulado emanado de los hornos de fabricación de ladrillos analizados.

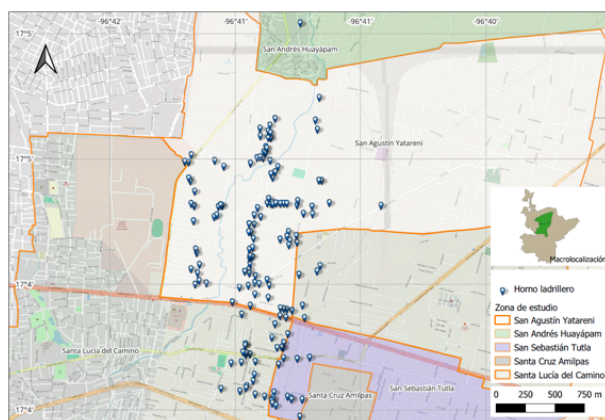
Resultados

Distribución espacial de hornos ladrilleros en la ZMO

En los cinco municipios estudiados se identificó la presencia de 165 hornos ladrilleros. La figura 3 muestra la localización georreferenciada de los hornos registrados en diversos recorridos de campo. En dicha imagen se logra observar que la mayor cantidad de hornos se concentra en el municipio de San Agustín Yatareni (119), seguido por Santa Lucía del Camino (30), San Sebastián Tutla (15), San Andrés Huayapam (1). En Santa Cruz Amilpas no se identificó evidencia de que existiera alguno (Mateos, 2023).

Figura 3

Ubicación geográfica de hornos ladrilleros identificados



Nota: adaptado de “Evaluación de la aplicación del modelo AERMOD para estimación de contaminantes atmosféricos emitidos por la industria ladrillera en Oaxaca” por Mateos (2023), [Reporte de Investigación, Universidad La Salle Oaxaca]. Repositorio Académico ULSA Oaxaca. Adaptado con permiso del autor.

Configuración espacial de los hornos de fabricación de ladrillos analizada a través de AERMOD

Los hornos estudiados fueron distribuidos en forma sistemática dentro de la ZMO, considerando una representación de todos los sectores de la zona

urbana, producción de ladrillo, capacidad del horno, consumo y uso combustible, predominando el uso de aserrín de pino amarillo, tiempo de cocción (combustión) y prácticas de los artesanos ladrilleros (Mateos, 2023). Se realizaron las corridas de modelación para siete hornos ladrilleros distribuidos en las ubicaciones mostradas en la tabla 1, cuatro de ellos en San Agustín Yatareni, dos en Santa Lucía del Camino y uno en San Sebastián Tutla, con la finalidad de tener una distribución representativa en el área de estudio (Mateos, 2023).

Tabla 1

Geolocalización de los hornos ladrilleros seleccionados

Horno	Coordenadas geográficas			Municipio
	Latitud	Longitud	El-elevación (msnm)	
1	17.071	-96.685	1556	Santa Lucía del Camino
2	17.085	-96.689	1595	San Agustín Yatareni
3	17.076	-96.691	1566	
4	17.070	-96.693	1559	
5	17.083	-96.692	1588	
6	17.065	-96.689	1552	Santa Lucía del Camino
7	17.061	-96.687	1547	San Sebastián Tutla

msnm: metros sobre el nivel del mar

Nota: adaptado de “Evaluación de la aplicación del modelo AERMOD para estimación de contaminantes atmosféricos emitidos por la industria ladrillera en Oaxaca” por Mateos (2023), [Reporte de Investigación, Universidad La Salle Oaxaca]. Repositorio Académico ULSA Oaxaca. Adaptado con permiso del autor.

Determinación de la velocidad de emisión

La velocidad de emisión resultante se determinó mediante la aplicación de la ecuación I, que implica el cálculo del producto entre el dato de consumo de la actividad o combustión de comburente por el factor de emisión. En este caso, se emplearon los factores de emisión obtenidos del documento AP-42,

sección 1.9-4 de la EPA (1993), clasificados como B y superiores al promedio según los estándares de la EPA para Notas puntuales y de área.

$$E = A \times FE \left(1 - \frac{ER}{100} \right) \quad (\text{ecuación I})$$

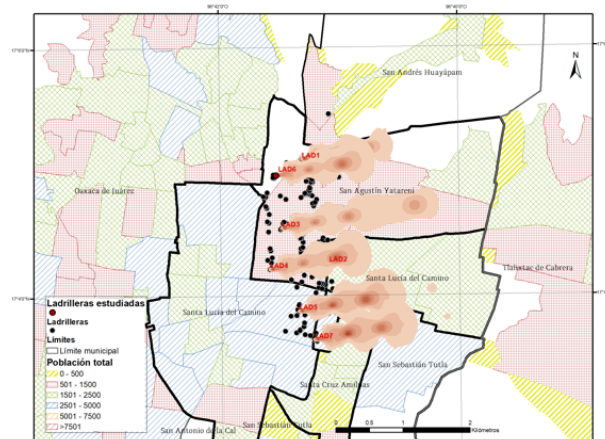
en donde la emisión es calculada en g/s, el factor A representa el dato de consumo de la actividad (consumo de combustible, producción) en las unidades adecuadas de masa o volumen por un tiempo determinado, el factor de emisión FE (considerando g/kg) y la eficiencia global de reducción de emisiones representada por ER (%).

Se consideró que la producción promedio de ladrillos en la zmo asciende a 15 000 ladrillos por día, lo cual se estableció con base en el censo y las entrevistas realizadas a los productores de los sitios documentados en la investigación de campo (Mateos, 2023). De igual forma, se estimó el tiempo requerido para la cocción y el enfriamiento en el horno ladrillero (para mayores detalles de las características consideradas, véase Mateos, 2023). A partir de lo anterior, se estimó que se requieren aproximadamente 1 260 kilocalorías para llevar a cabo el proceso de producción de un ladrillo de 2.2 kilogramos con aserrín de pino amarillo (*Pinus Patula* Schl et Cham), especie más extendida y de mayor importancia económica en Oaxaca de acuerdo con Castellanos y Treviño (2006). Además, se consideró un contenido de humedad en la madera de 25%, por lo que al realizar los cálculos necesarios se obtuvo una velocidad de emisión de 87.85 kilogramos de PM10 por día.

Visualización de datos obtenidos por AERMOD

En esta sección se presentan los resultados del modelo correspondientes a las 11 horas TLS del 1° de diciembre de 2016 (figura 4). Estos resultados indicaron concentraciones que variaron desde los 4.83×10^{-12} kg/m³ como valor mínimo hasta 1.10×10^{-4} kg/m³ como valor máximo promedio en esa hora. Se observó una dispersión que se extendía por encima de los dos kilómetros desde la Nota de emisión, como se ilustra en la figura 4. Esta dispersión afectó a los municipios de San Agustín Yatareni, San Sebastián Tutla y Santa Lucía del Camino, cuyas poblaciones van desde 5 521 hasta 50 362 habitantes de acuerdo con INEGI (2023), como es el caso del último municipio mencionado.

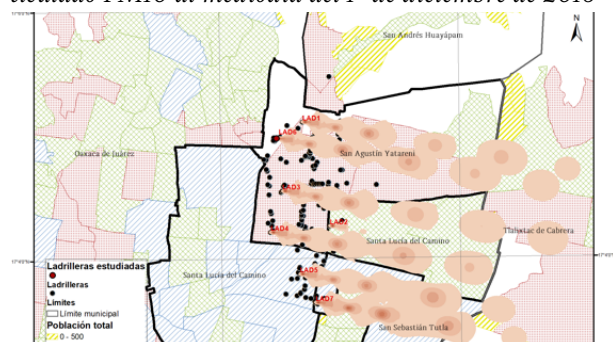
Figura 4
Representación gráfica de la dispersión de material particulado PM₁₀ a las 11 horas TLS



Nota: reproducido de “Evaluación de la aplicación del modelo aermod para estimación de contaminantes atmosféricos emitidos por la industria ladrillera en Oaxaca” por Mateos (2023), [Reporte de Investigación, Universidad La Salle Oaxaca]. Repositorio Académico ULSA Oaxaca. Reproducido con permiso del autor.

Durante el mediodía del 1° de diciembre de 2016, las concentraciones de material particulado registradas en el modelo oscilaron entre 3.23×10^{-9} kg/m³ como valor mínimo y 9.71×10^{-5} kg/m³ como valor máximo promedio durante esa hora. La dispersión se extendió aproximadamente hasta cuatro kilómetros en dirección sureste desde la Nota de emisión, impactando municipios como Tlaxiáctac de Cabrera, sobre todo por las emisiones de las ladrilleras identificadas como 2, 3 y 5, localizadas en los límites de San Agustín Yatareni, como se visualiza en la figura 5. Cabe destacar que, de acuerdo con INEGI (2023), Tlaxiáctac de Cabrera alberga una población total de 12 067 habitantes. La simulación registrada a la hora mencionada afectó a todos los municipios bajo estudio, excepto a San Andrés Huayapam.

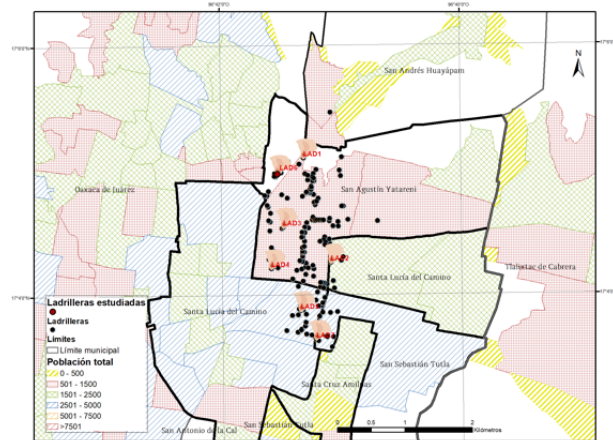
Figura 5.
Representación gráfica de la dispersión de material particulado PM10 al mediodía del 1° de diciembre de 2016



Nota: reproducido de “Evaluación de la aplicación del modelo AERMOD para estimación de contaminantes atmosféricos emitidos por la industria ladrillera en Oaxaca” por Mateos (2023), [Reporte de Investigación, Universidad La Salle Oaxaca]. Repositorio Académico ULSA Oaxaca. Reproducido con permiso del autor.

Para las concentraciones obtenidas por el modelo a las 18 horas TLS, se observaron concentraciones máximas de $2.19 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ y valores mínimos de $1.5 \times 10^{-13} \text{ kg/m}^3$. Se subraya la presencia de concentraciones elevadas a lo largo de una extensión de 100 metros, como se evidencia en la figura 6, donde la dispersión del material particulado se centraliza en las proximidades de las Notas con una orientación hacia el noreste.

Figura 6.
Representación gráfica de la dispersión de material particulado PM10 a las 18 horas TLS



Nota: Reproducido de “Evaluación de la aplicación del modelo AERMOD para estimación de contaminantes atmosféricos emitidos por la industria ladrillera en Oaxaca” por Mateos (2023), [Reporte de Investigación, Universidad La Salle Oaxaca]. Repositorio Académico ULSA Oaxaca. Reproducido con permiso del autor.

Del mismo modo que con los datos presentados previamente, se extrajeron los resultados correspondientes a las diferentes horas del periodo de modelado, lo que permitió identificar que las áreas más afectadas se ubican al este de la ZMO. Para consultar otras horas de estudio remitirse a Mateos (2023).

Discusión

De acuerdo con el censo llevado a cabo durante la investigación y la información proporcionada por el Instituto Estatal de Ecología y Cambio Climático de Oaxaca en 2013, la disposición y la cantidad de hornos ladrilleros existentes en la Zona Metropolitana de Oaxaca muestran valores que evidencian un aumento de 10.9%. Según Mateos (2023), se identificaron 165 hornos en funcionamiento, lo que supera los 147 hornos registrados en 2013. Esta distribución incluye 119 hornos en San Agustín Yatareni (72.1%), 30 en Santa Lucía del Camino (18.2%), 15 en San Sebastián Tutla (9.1%), uno en San Andrés Huayapam (0.6%), mientras que en Santa Cruz Amilpas no se detectó la presencia de ningún horno ladrillero. Un censo institucional realizado por las autoridades municipales podría dar certeza del número de hornos en operación.

De acuerdo con INEGI (2023), el número de pobladores que reside en los municipios analizados en la Zona Metropolitana de Oaxaca oscila entre los 5 521 y los 50 362 habitantes en los municipios de San Agustín Yatareni y Santa Lucía del Camino, respectivamente. Esto destaca la importancia de atender las emisiones provenientes de la industria ladrillera, ya que debido a su ubicación podría tener impactos importantes en zonas cercanas, sobre todo en condiciones de estabilidad atmosférica.

Conclusiones

La evaluación del modelo AERMOD se estimó con base en los datos meteorológicos WRF correspondientes al jueves 1° de diciembre del 2016 entre las 11 y las 23 horas tiempo local estándar. Los resultados de este estudio (detallado en Mateos, 2023) sobre el uso de un modelo de simulación numérica en la industria ladrillera del estado de Oaxaca brinda la oportunidad de comprender y evaluar la aplicación del modelo AERMOD, considerando las capacidades tecnológicas de *hardware* y *software* disponibles. Es importante destacar que las concentraciones de material particulado obtenidas en la simulación fueron

calculadas mediante factores de emisión y a partir de datos recopilados en el recorrido de campo, por lo que deben ser interpretadas como estimaciones y no como representaciones precisas de la realidad (Mateos, 2023). Este análisis permite identificar la dispersión de contaminantes atmosféricos y evaluar posibles impactos ambientales y en la salud de la población en la Zona Metropolitana de Oaxaca. En consecuencia, se establecen bases para investigaciones futuras y la aplicación de la metodología descrita. Además, se presentan oportunidades para las autoridades estatales y municipales, que carecen de recursos técnicos, científicos y tecnológicos en asuntos ambientales. El uso del modelo propuesto como herramienta de estimación podría contribuir a establecer un sistema de alerta temprana. Se sugiere continuar la investigación y aplicación de esta metodología una vez que se disponga de una base de datos meteorológicos confiable y de mediciones en campo de emisiones reales de la industria ladrillera para validar estadísticamente el modelo (Mateos, 2023).

Referencias

Castellanos, J., y Treviño, E. (2006). Estructura de bosques de pino pátula bajo manejo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera bosques*, 14(2), 51-63.

EPA (2003). AERMOD: Latest Features and Evaluation Results. U.S. Environmental Protection Agency; AERMOD_MEP.

EPA (2023). AERMOD: Model Formulation. U.S. Environmental Protection Agency; Office of Air Quality Planning and Standards Air Quality Assessment Division.

INECC y Semarnat (2018). Informe Nacional de Calidad del Aire 2017, México (No. 1; p. 317). Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2023, diciembre 10). *Censos y conteos de población y vivienda, censo 2020*. <https://inegi.org.mx/datosabiertos/>

Instituto Estatal de Ecología y Desarrollo Sustentable (2013). Estudio de Factibilidad Legal, Ambiental, Social y Económica para reducir o evitar las emisiones a la atmósfera del Sector Ladrillero en la Zona Metropolitana de Oaxaca. (No. 1; Diagnóstico Ambiental, p. 30). Instituto Estatal de Ecología y Desarrollo Sustentable; Diagnóstico Ambiental.

Mateos Zarate, A. F. (2023). Evaluación de la aplicación del modelo AERMOD para estimación de contaminantes atmosféricos emitidos por la industria ladrillera en Oaxaca. [Reporte de Investigación, Universidad La Salle Oaxaca]. Repositorio Académico ULSA Oaxaca.

Mendoza, A., y García, M. (2009). Aplicación de un modelo de calidad del aire de segunda generación a la zona metropolitana de Guadalajara, México. *Rev. Int. Contam. Ambiental*, 25(2), 73-85.

OMS, Organización Mundial de la Salud (2018, junio 23). Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado. <https://www.who.int/es/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>

SEA, Servicio de Evaluación Ambiental, Gobierno de Chile (2023). *Guía para el uso de modelos de calidad del aire en el Servicio de Evaluación Ambiental* (p.16). Segunda edición.

Tejeda Le Blanc, & Cia., S.C. LT Consulting (2011). *Inventario de emisiones de gases criterio para el estado de Oaxaca* (p. 90). Instituto Estatal de Ecología y Desarrollo Sustentable.

US-EPA (2023, noviembre 13). Method Validation and Peer Review Policies and Guidelines. <https://www.epa.gov/measurements-modeling/method-validation-and-peer-review-policies-and-guidelines>

Derechos de Autor© 2023 Alan Fernando Mateos Zárate, Sandy-Edith Benítez-García, Francisco Hernández-Ortega, Abraham Ortinez-Alvarez



Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0. Usted es libre para Compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato— y Adaptar el documento —remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de: Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra. Resumen de licencia - Texto completo de la licencia