



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE GEOGRAFÍA**



**“ANÁLISIS ESPACIO-TEMPORAL DE INDUSTRIAS  
PARA LA REGIONALIZACIÓN DE ZONAS DE  
EXPOSICIÓN POR LA MALA CALIDAD DEL AIRE EN  
MÉXICO”**

**TESIS**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**LICENCIADO EN GEOGRAFÍA**

PRESENTA:

**JOAN FER ZAMORA MANCIO**

**ASESOR DE TESIS:**

DR. EN C. A. RAYMUNDO ORDOÑEZ SIERRA

**REVISORES DE TESIS:**

DR. EN C. A. MIGUEL ANGEL GÓMEZ ALBORES

DR. EN C. A. LUIS RICARDO MANZANO SOLÍS

TOLUCA, ESTADO DE MÉXICO, NOVIEMBRE 2025







# Índice

|   |    |
|---|----|
| Resumen.....  | 1  |
| Abstract .....  | 3  |
| 1. Introducción .....   | 5  |
| 2. Antecedentes.....  | 7  |
| 2.1 Impactos de la contaminación debido a la actividad industrial ..... | 7  |
| 2.2 Tipos de industrias de mayor contaminación .....                    | 12 |
| 2.3 Deterioro ambiental en México.....                                  | 19 |
| 2.4 Índice de calidad del aire y sus impactos .....                     | 21 |
| 2.5 Métodos de regionalización .....                                    | 22 |
| 3. Justificación .....  | 25 |
| 4. Hipótesis.....   | 27 |
| 5. Objetivos.....   | 28 |
| 5.1 Objetivo general.....   | 28 |
| 5.2 Objetivos específicos.....  | 28 |
| 6. Marco – Teórico metodológico .....                                   | 29 |
| 6.1 Regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental (RESA's).....          | 29 |
| 6.2 Deterioro ambiental .....   | 29 |
| 6.3 Industria.....  | 30 |
| 6.3.1 Procesos en termoeléctrica .....                                  | 30 |
| 6.3.2 Sector cementero .....  | 32 |
| 6.3.3. Procesos de refinación.....                                      | 34 |
| 6.3.3.1. Producción total.....  | 35 |
| 6.3.4. Procesos petroquímicos.....                                      | 36 |
| 6.3.5. Procesos de la minería .....                                     | 36 |
| 6.3.6. Proceso en la industria de química y papel.....                  | 38 |
| 6.4 Material Particulado.....   | 40 |

|  |     |
|--|-----|
| 6.5. Método de regionalización (Clúster) .....   | 40  |
| 7. Metodología.....  | 42  |
| 7.1 Zona de estudio .....  | 43  |
| 7.2 Recopilación de fuentes bibliográficas .....   | 43  |
| 7.2.1 Identificación de industrias .....   | 44  |
| 7.3 Procesamiento de la base de datos DENUÉ.....   | 45  |
| 7.4 Densidad de población.....   | 48  |
| 7.5 Imágenes PM <sub>2.5</sub> .....   | 48  |
| 7.6 Proceso de regionalización.....  | 49  |
| 8. Resultados .....  | 52  |
| 8.1 Análisis espaciotemporal de PM <sub>2.5</sub> .....  | 52  |
| 8.2 Concentración de industrias en México y su impacto en PM <sub>2.5</sub> .....                            | 56  |
| 8.3 Ubicación de industrias en las Regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental identificadas (RESA's) ..... | 78  |
| 8.4 Análisis de regionalizaciones por PM <sub>2.5</sub> y propuesta de nuevas RESA's .....                   | 108 |
| 9. Conclusiones.....   | 120 |
| 10. Recomendaciones .....  | 124 |
| 11. Referencias bibliográficas .....   | 126 |

## Índice de figuras

|  |           |
|--|-----------|
| <i>Figura 1: Procesos que se llevan a cabo en una planta termoeléctrica.....</i>                 | <i>32</i> |
| <i>Figura 2. Procesos de fabricación del cemento.....</i>  | <i>33</i> |
| <i>Figura 3. Procesos realizados en una refinería .....</i>                                      | <i>35</i> |
| <i>Figura 4. Tipos de minas.....</i>   | <i>37</i> |
| <i>Figura 5. Procesos realizados para la fabricación de la industria de química y papel.....</i> | <i>39</i> |
| <i>Figura 6. Esquema de materia particulada<sub>2.5</sub> .....</i>                              | <i>40</i> |
| <i>Figura 7. Esquema metodológico.....</i>   | <i>42</i> |
| <i>Figura 8. Zona de estudio.....</i>  | <i>43</i> |
| <i>Figura 9. Earth Trends Modeler .....</i>  | <i>49</i> |
| <i>Figura 10. Regionalización por clúster .....</i>  | <i>50</i> |
| <i>Figura 11. Serie de tiempo de PM<sub>2.5</sub> 1998 a 2022.....</i>                           | <i>53</i> |
| <i>Figura 12. Ubicación de termoeléctricas en México .....</i>                                   | <i>57</i> |
| <i>Figura 13. Gráfica de concentración de Pm<sub>2.5</sub> en termoeléctricas.....</i>           | <i>59</i> |
| <i>Figura 14. Ubicación de cementeras en México.....</i>   | <i>60</i> |
| <i>Figura 15. Gráfica de concentración de Pm<sub>2.5</sub> en cementeras .....</i>               | <i>62</i> |
| <i>Figura 16. Ubicación de refinerías en México.....</i>   | <i>63</i> |
| <i>Figura 17. Gráfica de concentración de PM<sub>2.5</sub> en refinerías .....</i>               | <i>64</i> |
| <i>Figura 18. Gráfica de producción total.....</i>   | <i>66</i> |
| <i>Figura 19. Ubicación de las petroquímicas en México .....</i>                                 | <i>68</i> |
| <i>Figura 20. Ubicación de industria química y papel en México .....</i>                         | <i>72</i> |
| <i>Figura 21. Ubicación de minas en México .....</i>   | <i>74</i> |
| <i>Figura 22. Ubicación de industria de fundición en México.....</i>                             | <i>76</i> |
| <i>Figura 23. Ubicación de industria de cal y vidrio en México .....</i>                         | <i>77</i> |
| <i>Figura 24. Industrias totales en las RESA's.....</i>  | <i>80</i> |
| <i>Figura 25. Distribución espacial de industria termoeléctrica .....</i>                        | <i>84</i> |
| <i>Figura 26. Distribución espacial industria cementera.....</i>                                 | <i>86</i> |
| <i>Figura 27. Distribución espacial de refinería .....</i>                                       | <i>87</i> |
| <i>Figura 28. Distribución espacial de industria de petroquímica.....</i>                        | <i>88</i> |
| <i>Figura 29. Distribución espacial de química y papel.....</i>                                  | <i>90</i> |
| <i>Figura 30. Distribución espacial de minería.....</i>  | <i>92</i> |
| <i>Figura 31. Distribución espacial de fundición .....</i>                                       | <i>94</i> |

|   |            |
|---|------------|
| <i>Figura 32. Distribución espacial de Industria de cal y vidrio.....</i> | <i>95</i>  |
| <i>Figura 33. Densidad de industrias en las RESA's .....</i>              | <i>97</i>  |
| <i>Figura 34. Regionalización .....</i>                                   | <i>110</i> |
| <i>Figura 35.Propuesta de RESA's (Nuevo león).....</i>                    | <i>115</i> |
| <i>Figura 36. Propuesta de nuevas RESA's.....</i>                         | <i>116</i> |

## Índice de tablas

|   |            |
|---|------------|
| <i>Tabla 1. Claves de Industrias .....</i>  | <i>45</i>  |
| <i>Tabla 2. Sectores de personal ocupado.....</i>   | <i>46</i>  |
| <i>Tabla 3. Número total de industrias seleccionadas .....</i>                                | <i>47</i>  |
| <i>Tabla 4. Centrales termoeléctricas en México .....</i>                                     | <i>57</i>  |
| <i>Tabla 5. Cementeras ubicadas en el Valle del Mezquital, Hidalgo .....</i>                  | <i>61</i>  |
| <i>Tabla 6. Refinerías en México.....</i>   | <i>64</i>  |
| <i>Tabla 7. Petroquímicas en México .....</i>   | <i>69</i>  |
| <i>Tabla 8. Área y población en RESA's .....</i>  | <i>80</i>  |
| <i>Tabla 9. Densidad de población en la Resa del Salto, Jalisco .....</i>                     | <i>98</i>  |
| <i>Tabla 10. Densidad de población en la Resa De la Cuenca Independencia, Guanajuato.....</i> | <i>99</i>  |
| <i>Tabla 11. Densidad de población en la Resa del Valle del Mezquital, Hidalgo .....</i>      | <i>100</i> |
| <i>Tabla 12. Densidad de población en la Resa de Lerma, Estado de México ..</i>               | <i>101</i> |
| <i>Tabla 13. Densidad de población en la Resa de Tlaxcala, Tlaxcala.....</i>                  | <i>102</i> |
| <i>Tabla 14. Densidad de población en la Resa de Valle de Puebla, Puebla ....</i>             | <i>104</i> |
| <i>Tabla 15. Densidad de población en la Resa de Libres Oriental, Puebla y Veracruz .....</i> | <i>106</i> |
| <i>Tabla 16. Densidad de población de Istmo Norte, Veracruz .....</i>                         | <i>107</i> |
| <i>Tabla 17. Kilómetros cuadrados en regionalización.....</i>                                 | <i>111</i> |

## Acrónimos y abreviaciones

|                       |   |
|-----------------------|---|
| <b>ACAG</b>           | Atmospheric Composition Analysis Group                  |
| <b>CDMX</b>           | Ciudad de México  |
| <b>CEMEX</b>          | Cementos Mexicanos                                      |
| <b>CFE</b>            | Comisión Federal de Electricidad                        |
| <b>CO<sub>2</sub></b> | Dióxido de Carbono                                      |
| <b>CONAHCYT</b>       | Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías |
| <b>COV</b>            | Compuestos Orgánicos Volátiles                          |
| <b>CSR</b>            | Corporate Social Responsibility                         |
| <b>Cr</b>             | Cromo   |
| <b>DENUE</b>          | Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas  |
| <b>DOF</b>            | Diario Oficial de la Federación                         |
| <b>DENUE</b>          | Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas  |
| <b>EPA</b>            | U.S. Environmental Protection Agency                    |
| <b>INECC</b>          | Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático       |
| <b>Kg</b>             | Kilogramos  |
| <b>Km<sup>2</sup></b> | Kilómetros cuadrados Kilogramos                         |
| <b>MB/D</b>           | Miles de barriles por día Kilómetros cuadrados          |
| <b>Cr</b>             | Cromo   |
| <b>Cd</b>             | Cadmio  |
| <b>Mn</b>             | Manganeso   |
| <b>Zn</b>             | Zinc  |
| <b>Ni</b>             | Níquel  |
| <b>NO<sub>2</sub></b> | Dióxido de Nitrógeno                                    |
| <b>NOM</b>            | Normas Oficiales Mexicanas                              |
| <b>NO<sub>x</sub></b> | Óxidos de Nitrógeno                                     |
| <b>O<sub>3</sub></b>  | Ozono   |

|                         |  |
|-------------------------|--|
| <b>OMC</b>              | Organización Mundial del Comercio  |
| <b>OMS</b>              | Organización Mundial de la Salud   |
| <b>PB</b>               | Plomo  |
| <b>PEMEX</b>            | Petróleos Mexicanos  |
| <b>PM<sub>2.5</sub></b> | Materia Particulada 2.5  |
| <b>PM<sub>10</sub></b>  | Materia Particulada 10   |
| <b>RESA</b>             | Región de Emergencia Sanitaria y Ambiental                                     |
| <b>SEMARNAT</b>         | Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales                              |
| <b>SIG</b>              | Sistema de Información Geográfica  |
| <b>SO<sub>2</sub></b>   | Dióxido de Azufre  |
| <b>SPSS</b>             | Statistical Package for the Social Sciences                                    |
| <b>TLCAN</b>            | Tratado de Libre Comercio de América del Norte                                 |
| <b>UNESCO</b>           | Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura |
| <b>WWF</b>              | World Wildlife Fund for Nature   |
| <b>Zn</b>               | Zinc   |

## Resumen

El acelerado crecimiento de la industrialización y la urbanización ha desencadenado una crisis ambiental, particularmente en lo que respecta a la contaminación atmosférica. De acuerdo con datos de la Organización Mundial de la Salud (Ajanovic & Varo, 2022; OMS, 2018), la exposición a partículas finas por encima del límite permisible de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  provoca aproximadamente 7 millones de muertes prematuras al año a nivel mundial.

Las principales fuentes de estas emisiones corresponden a industrias con altos niveles contaminantes, como refinerías, plantas petroquímicas, termoeléctricas y cementeras, así como los sectores químico, paplero, vidriero, de cal y de fundición. Estos sectores liberan compuestos tóxicos y partículas dañinas durante sus procesos de extracción y producción. En México, esta problemática ha llevado a la identificación de Regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental (RESA's), donde los niveles de contaminación atmosférica pueden representar un riesgo para la población.

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo identificar las industrias más contaminantes y realizar una regionalización de la contaminación atmosférica a nivel nacional, con el fin de proponer nuevas Regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental (RESA's).

La metodología se estructuró en cinco etapas: (1) revisión bibliográfica enfocada en el contexto nacional (México), abordando los tipos de industrias con mayores emisiones, el deterioro ambiental asociado y los impactos de las partículas finas ( $\text{PM}_{2.5}$ ); (2) descarga y procesamiento de bases de datos geoespaciales del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE), considerando únicamente establecimientos con más de 51 trabajadores; (3) identificación y georreferenciación de ocho industrias seleccionadas por su alta carga contaminante; (4) análisis espacio-temporal de la concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  entre 1998 y 2020, generación de clústeres; y (5) análisis de la regionalización en función de la distribución industrial y la actividad productiva, con el propósito de proponer nuevas RESA's.

Los resultados permitieron identificar que las industrias seleccionadas se encuentran en regiones con concentraciones promedio de  $PM_{2.5}$  superiores al límite permisible establecido por la NOM-025-SSA1-2021 ( $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Las regiones identificadas corresponden a tres zonas densamente urbanizadas en el norte y centro del país, que abarcan entidades federativas como Monterrey, Estado de México, Jalisco y Veracruz. Estas áreas coinciden con los principales corredores industriales, caracterizados por una alta concentración de actividades manufactureras y de transformación. Tras los datos obtenidos evidencian la necesidad de revisar y actualizar los criterios de delimitación de las RESA's, así como de implementar mecanismos más robustos de gestión ambiental orientados a la mitigación de emisiones atmosféricas en estos núcleos industriales.

## **Abstract**

The rapid growth of industrialization and urbanization has triggered an environmental crisis, particularly with regard to air pollution. According to data from the World Health Organization (Ajanovic & Varo, 2022; WHO, 2018), exposure to fine particulate matter above the permissible limit of  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  causes approximately 7 million premature deaths per year worldwide.

The main sources of these emissions are industries with high levels of pollution, such as refineries, petrochemical plants, thermoelectric power plants, and cement plants, as well as the chemical, paper, glass, lime, and smelting sectors. These sectors release toxic compounds and harmful particles during their extraction and production processes. In Mexico, this problem has led to the identification of Health and Environmental Emergency Regions (RESAs), where air pollution levels can pose a risk to the population.

The objective of this research was to identify the most polluting industries and to regionalize air pollution at the national level in order to propose new Health and Environmental Emergency Regions (RESA's).

The methodology was structured in five stages: (1) literature review focused on the national context (Mexico), addressing the types of industries with the highest emissions, the associated environmental degradation, and the impacts of fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>); (2) downloading and processing geospatial databases from the National Statistical Directory of Economic Units (DENUE), considering only establishments with more than 51 workers; (3) identification and georeferencing of eight industries selected for their high pollutant load; (4) spatio-temporal analysis of PM<sub>2.5</sub> concentration between 1998 and 2020, cluster generation; and (5) analysis of regionalization based on industrial distribution and productive activity, with the purpose of proposing new RESAs.

The results identified that the selected industries are located in regions with average PM<sub>2.5</sub> concentrations above the permissible limit established by NOM-025-SSA1-2021 ( $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

The regions identified correspond to three densely urbanized areas in the north and center of the country, covering states such as Monterrey, Mexico State, Jalisco, and Veracruz. These areas coincide with the main industrial corridors, characterized by a high concentration of manufacturing and processing activities. The data obtained highlight the need to review and update the criteria for delimiting RESA's.

The regions identified correspond to three densely urbanized areas in the north and center of the country, covering states such as Monterrey, Mexico State, Jalisco, and Veracruz. These areas coincide with the main industrial corridors, characterized by a high concentration of manufacturing and processing activities. The data obtained highlights the need to review and update the criteria for delimiting RESA's, as well as to implement more robust environmental management mechanisms aimed at mitigating atmospheric emissions in these industrial centers.

## **1. Introducción**

A nivel mundial, se han identificado registros que señalan que gran parte de la población vive en ambientes contaminados, superando los límites máximos permisibles establecidos en las directrices de la Organización Mundial de la Salud sobre la calidad del aire, de  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en 2021 (OMS, 2021) ocasionando anualmente alrededor de 6,7 millones de muertes prematuras, en países de bajos recursos (OMS, 2022).

A pesar de que la actividad industrial permite que al ser humano se le faciliten las actividades cotidianas, la contaminación que genera es la encargada de 1 de cada 10 muertes en el mundo (Binns, 2023), esto se puede percibir principalmente en países en vías de desarrollo económico, debido a la gran cantidad de instalaciones industriales y los gases que emiten a la atmósfera (Abubakar Siddique & Kiani, 2020), estas emisiones están relacionadas con la quema de combustibles fósiles, en actividades para producir cemento, generar energía eléctrica, fabricación de hierro, por mencionar algunas (European environment agency, 2020).

A nivel mundial hay diversos problemas ambientales, como la pérdida de ecosistemas, la contaminación atmosférica, relacionado con el sector industrial, por los beneficios económicos, en consecuencia, ha generado daños en diversas magnitudes por el agotamiento de recursos naturales, su degradación y la modificación del entorno (Oláh et al., 2020; SEMARNAT, 2008; Suárez & Molina, 2014).

En México, las problemáticas ambientales no son tan diferentes, debido a la contaminación atmosférica, exposición a tóxicos, cambio climático relacionados al sector industrial y el crecimiento demográfico (Riojas-Rodríguez et al., 2013). Entre 1993 y 1997, en el país se implementó una serie de reformas en leyes, normas y artículos constitucionales vinculados a temas ambientales, en cumplimiento a los compromisos adquiridos por el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) para su incorporación a la Organización Mundial del Comercio (OMC). Estas modificaciones otorgaron a las empresas multinacionales un mayor control sobre el territorio mexicano, lo que permitió la instalación de industrias altamente contaminantes

provenientes de países con regulaciones más estrictas sobre sustancias y vertidos al medio ambiente. Como resultado, el país experimentó un crecimiento industrial impulsado por empresas dedicadas a la producción de sustancias químicas y tóxicas, que representaban un riesgo significativo tanto para el entorno natural como para la salud de las comunidades expuestas (Barreda, 2023).

En este contexto, se han establecido normas y directrices que fijan límites máximos permitidos para los contaminantes en el aire, sosteniendo que la exposición a concentraciones de contaminantes superiores a los niveles de referencia puede generar efectos adversos para la salud (DOF, 2021; OMS, 2021).

El objetivo del presente estudio, fue analizar la distribución espacio temporal de la contaminación atmosférica por industrias a través de un método clúster para la identificación de regiones expuestas en México, a partir de la identificación de industrias más contaminantes, información de materia particulada 2.5 a través de un método de regionalización (clúster).

## 2. Antecedentes

La exposición a la contaminación del aire constituye uno de los principales riesgos para la salud pública, debido a que alrededor del 91% de la población en el mundo respira aire de mala calidad, causando que alrededor de 6.7 millones de personas mueran por muerte prematura, neumonía, enfermedades cardiovasculares y respiratorias (Ajanovic & Varo, 2022; OMS, 2018).

### 2.1 Impactos de la contaminación debido a la actividad industrial

La contaminación ambiental es un problema de índole mundial, ya que genera emisiones de gases y partículas que afectan al ambiente, estas emisiones pueden deteriorar la calidad del aire, del agua y suelo (Bravo Calle et al., 2021). Aunque la industrialización, ha sido un pilar del desarrollo de la economía y un generador de creciente presión para el medio ambiente, en diversos estudios se ha reflejado su impacto.

En particular, la contaminación del suelo puede originarse por diversas causas, siendo las actividades industriales, la minería, la agricultura y la construcción las más relevantes. Estas actividades introducen sustancias tóxicas que afectan la composición del suelo y representan riesgos para la población (Iberdrola, 2020).

En china, esta problemática se ha intensificado considerablemente debido a diversas actividades antropogénicas, que han generado una alta contaminación por metales pesados como plomo, cadmio y arsénico, que superan las concentraciones establecidas por el país de 1000 nanogramos (ng.g) (Li et al., 2019).

Por su parte Gangadhar en 2014, realizó un estudio en la India, en el que identificó diversos contaminantes en el suelo entre los que destacaron cadmio y plomo. Además, identificó que los contaminantes provenían de las actividades industriales, la agricultura y la quema de combustibles fósiles a partir de la metodología sobre las características del suelo, la salud del suelo, y la evaluación de riesgos (Gangadhar, 2014).

En Rusia se estudió el comportamiento del suelo en 30 años, a partir de una metodología basada en la revisión de artículos, reportes, usando indicadores de los límites máximos permisibles, concentraciones de prueba y el índice de contaminación total, teniendo como resultado que el 1.7% del suelo analizado es peligroso en las ciudades de Norilsk y Monchegorsk, debido a que estos exceden los límites del níquel hasta 500 veces más (80 mg/kg). Para Moscú los suelos monitoreados fueron clasificados como débilmente contaminados (Barsova et al., 2019).

Un análisis realizado por Swain, (2024) documentó las regiones en las que operan industrias metalúrgicas y de procesamiento de minerales, encontrando altas concentraciones de metales pesados en aire, primordialmente en regiones con en las que no existen regulaciones ambientales. Este estudio empleó el índice de contaminación ambiental para demostrar la existencia tóxicos pesados como plomo, cadmio y mercurio que se encuentran presentes en el suelo, los cuales pueden llegar a volatilizarse y ser inhalados por la población.

En Bangladesh, se identificaron que las descargas industriales han alterado el suelo, lo cual ha impactado de forma negativa sobre la producción de arroz, conllevando el incrementado enfermedades en las localidades cercanas y la reducción de la biodiversidad acuática (Afrad et al., 2020).

En México, se han realizado estudios relacionados con la extracción de metales, por ejemplo, en Zacatecas, se enfocaron en la extracción de oro y plata, a partir de la contaminación del suelo. Aplicaron una metodología de la replicación de un proceso industrial de cementación y lixiviación, tomando muestras del suelo de antes y después, sometiéndolas a análisis químicos. Como resultado, se determinó que el 72% del suelo es suelo que es removido con facilidad en un proceso de tratamiento; de este porcentaje, el 78% fue estabilizado mediante cementación (Ogura et al., 2003).

La actividad minera en San Luis Potosí, México, ha ocasionado un notable impacto ambiental, producto de más de dos siglos de explotación continua de oro, plata, arsénico, zinc y plomo. En este estudio, se analizó el suelo en un área de 105 km<sup>2</sup> en el que se localizaron metales pesados con 223 pruebas de

espectrometría de absorción atómica, teniendo como resultados que el 84% de las pruebas con 100 mg/kg de arsénico (nivel de intervención de la EPA) (Razo et al., 2004).

### ***Contaminación del agua***

La contaminación hídrica se manifiesta a través de cambios en la estructura química y física del agua, hasta que queda inutilizable, es decir, que no puede ser consumido ni utilizado en la agricultura (Iberdrola, 2025).

Un estudio realizado en China identificó la relación que existen entre la contaminación industrial en el agua y sus efectos en la salud en los años 2011-2013, en ciudades piloto del país, se evaluó la eficiencia del tratamiento ambiental del agua con el índice de productividad basándose en la fórmula del *Luenberger Productivity Index*, comparando inputs y outputs ambientales y económicos, teniendo como resultados un incremento de contaminación industrial, esta condición se vinculó con un empeoramiento de la salud humana, reflejado en un incremento de los síntomas depresivos (Wang & Yang, 2016).

Arif y colaboradores realizaron un análisis sobre la contaminación del agua a partir de los desechos de las industrias, enfocándose en los impactos en la población y ecosistemas acuáticos, su metodología se basó en la búsqueda científica centrándose en el río Ganges usando un modelo representativo de las consecuencias de la actividad industrial. Como resultado encontraron metales pesados que son vertidos a partir de industrias textiles, mineras, y químicas superando los límites establecidos por parte de la OMS (Arif et al., 2020).

En Rajasthan, la expansión industrial se ha producido de forma acelerada y sin una adecuada planificación ambiental, lo que ha provocado la descarga de contaminantes en cuerpos de agua, de industrias químicas, cementeras y textiles, como metodología analizaron zonas industriales, el tipo de industrias y las consecuencias ambientales, esto les permitió identificar de forma local los vertidos de las industrias y la falta de tratamiento y regulación del agua que vierten las industrias (Rajput et al., 2017).

En México, el río Santiago es un claro ejemplo sobre la contaminación ambiental. Este río recibe vertidos tóxicos de más de 300 industrias provenientes del sector industrial de Ocotlán-El Salto, que incluye industrias metalmeccánica, metalúrgicas, química-farmacéutica, automotriz, y alimentos (González Valencia, 2017).

En el alto Atoyac se analizaron los impactos del desarrollo industrial en el agua, a partir de la aplicación de cinco parámetros fisicoquímicos medidos de 2012 a 2019 de forma mensual y anual, aplicando el método de PI que fundamenta en los límites estándar permitidos para el parámetro de aguas superficiales establecidos por la OMS, para saber el grado de contaminación. Detectaron que en 2012 el agua estaba poco contaminada, para 2020 fue clasificada como “altamente impura”(Estrada-Rivera et al., 2022).

Un estudio realizado por Chakraborti y Shimshack señaló que diversas industrias ubicadas en zonas urbanas de México vierten contaminantes en áreas marginadas, a partir de la recopilación de datos de descargas en el agua durante nueve años, enfocándose en níquel (Ni), cromo (Cr) y cadmio (Cd), entre otros contaminantes. Además utilizaron modelos de efectos fijos, identificando las zonas son afectadas y que se vuelven más marginadas (Chakraborti & Shimshack, 2022).

### ***Contaminación Atmosférica***

La contaminación en la atmosfera es aquella en la que se presencian diferentes partículas suspendidas y contaminantes tóxicos siendo una mezcla que ponen en riesgo al medio ambiente y población.

En Indiana, Estados Unidos, el sector industrial ha liberado millones de aromáticos, como el benceno, acetaldehído y formaldehído en la atmósfera, generando problemas de salud para las comunidades cercanas (Clean Air Task Force, 2021).

La fundición, es una práctica que consiste en la fusión de metales en hornos a altas temperaturas genera la emisión de partículas y gases contaminantes como: polvo mineral, carbono, y metales pesados como Cr, plomo (Pb) y zinc

(Zn) (Mgonja, 2017; Natgeo, 2022; Park et al., ; Ramaswamy et al., 2012; Sosa et al., 2013).

Por su parte, la industria cementera es una de las que más produce emisiones de dióxido de carbono dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), contribuyendo con el 5% de las emisiones a nivel global (Dubey, 2013). Este proceso necesita de altas cantidades de energía y de materiales como arcilla y caliza, que se calcinan a 1450°C, lo que produce cerca de 900 kg de CO<sub>2</sub> por cada 1000 kg de cemento elaborado (Mahasenan et al., 2003). Investigaciones en China (Shen et al., 2017; Lin & Zhang, 2016) han indicado cómo esta actividad es una de las más contaminantes por su alto requerimiento energético y emisiones continuas.

En relación con las refinerías, la contaminación se origina cuando se inicia el proceso de refinación del petróleo, siendo una de las industrias más contaminantes a nivel mundial y de peligro para los seres humanos por la emisión de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), sulfuro de hidrógeno (H<sub>2</sub>S), monóxido de carbono (CO), y materiales tóxicos (Adebiyi, 2022).

Pierard et al. (2019) realizaron un estudio sobre las refinerías y el cambio climático, en el que expone un comportamiento de incremento temperaturas en Mexicali y el impacto que tuvo en los pelícanos y aves costeras, los autores mencionan que las variables climáticas cambiaron por la actividad industrial.

En México, la actividad industrial es clave para el desarrollo económico, pero a su vez, es responsable de una parte de la degradación ambiental (Cubas & Flores, 2023). Entre las industrias identificadas como generadoras de contaminantes nocivos, se encontraron las de fundición, plantas cementeras y refinerías, las cuales son consideradas altamente tóxicas por la cantidad y tipo de emisiones que generan.

Por su parte, De la Mora (2012), analizó cómo las instalaciones en la Refinería de Tula de Allende, Hidalgo, ha transformado los sectores, social, económico, y territoriales de esta región. Aunque el proyecto ha generado empleos y se planteó como una iniciativa ecológica, en realidad ha provocado impactos negativos tanto en el ecosistema como en la salud de la población.

Las industrias incluidas en este estudio (refinerías, minas, fundición, termoeléctricas) fueron consideradas por la generación de compuestos tóxicos como partículas finas. La OMS (2016) y el PNUMA, (2019) mencionan que las industrias termoeléctricas y petroquímicas contribuyen de manera importante a los niveles de contaminación atmosférica.

Otro factor importante es el daño potencial que las industrias causan a lo largo del tiempo. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (por sus siglas en inglés EPA, (2015) clasificó a la industria minera, refinerías y petroquímica entre los sectores industriales de riesgo para la salud, no solo por la toxicidad de los compuestos que emiten, sino también por el tiempo que permanecen en la atmósfera. El estudio de Kampa & Castanas, (2008) menciona que la exposición crónica a contaminantes emitidos por estas industrias está asociada con efectos negativos sobre la salud pública, especialmente en poblaciones vulnerables que viven cerca de complejos industriales.

## **2.2 Tipos de industrias de mayor contaminación**

### ***Termoeléctricas***

Las termoeléctricas son un problema para el medio ambiente, debido a la cantidad de contaminantes vertidos en el agua y las emisiones de gases de efecto invernadero que emiten a la atmósfera (Critchley, 2019).

Algunos de los estudios relacionados con las termoeléctricas son el de Liu et al., (2017) en Estados Unidos, quienes evaluaron la vulnerabilidad de la generación de la energía ante el cambio climático, para ello, combinaron dos modelos: el Modelo de sistema terrestre y el Modelo de generación de energía eléctrica. Obteniendo como resultados que al subir las temperaturas las plantas necesitan grandes cantidades de agua para poder enfriarlas, por lo que, al estar en climas cálidos puede tener restricciones de operar y un impacto negativo en el ambiente y la población.

Mientras tanto, en Brasil se realizó un estudio en el que analizaron que el consumo del 70% de electricidad, genera cambios negativos en la calidad de

agua, alteraciones climáticas, enfermedades, pérdida de la biodiversidad, sustentando que la industria termoeléctrica está vinculada con los efectos adversos sobre el medio ambiente (von Sperling, 2012).

Para Reino Unido Byers, et al., (2014) realizaron un estudio refiriendo a que el 90% de la energía, es proveniente de las termoeléctricas. Se presentaron dos resultados, el primero reveló que el consumo de un 5% está relacionada con la generación eléctrica, el segundo fue la evaluación de carbono, señalando que el sector es el encargado de un 32% de emisiones en este país y estimaron que para el año 2050 se espera una reducción hasta el 10% para que exista una descarbonización proveniente de las plantas.

En México, la cuenca de Tula, ha sido objeto de un monitoreo constante debido a la contaminación generada por la central termoeléctrica, por el uso de combustóleo, un residuo de petróleo crudo que contiene azufre provocando altas concentraciones tóxicas que llegan a la zona norte del centro del país, teniendo una mala calidad el aire (Chacón et al., 2021).

Asimismo, se ha identificado que la CFE no cumple con los requisitos de las normas operativas ni ambientales, un ejemplo es “Francisco Pérez Ríos” un complejo contaminante que impacta a la salud de población, ya “que esta termoeléctrica es alimentada por combustóleo” y excede las concentraciones establecidas en la norma mexicana y es “responsable de 16 mil muertes prematuras en zonas cercanas al Valle del Mezquital, municipios del estado de México y algunas alcaldías de la CDMX”(Greenpeace México, 2025).

### **Cementeras**

En relación con la industria cementera, es la que anualmente se encarga de emitir entre el 4% y 8% de gases tóxicos totales en el planeta, debido al uso del hormigón (Amaechi, 2022), una mezcla que se compone de pasta adhesiva de cemento con agua llamada cementicia, conformada por complementos gruesos (roca partida) y fina (arena) (Perles, 2003). Das et al., (2023) mostraron las consecuencias para el medio ambiente (la destrucción de los ecosistemas y desequilibrio ecológico), a casusa de la

extracción de recursos no renovables (roca caliza) ya que en su proceso conlleva a la generación de polvo que impacta en ese entorno.

En tanto, Kudtarkar, (2018) menciona que la India es el segundo país considerado de mayor producción de cemento a nivel mundial. En el estudio se analizaron los informes de sostenibilidad de las empresas, a través de la aplicación de distintos parámetros, principalmente los ambientales como lo son la energía, la reducción de emisiones y el agua, gestión de recursos que son importantes para que esta industria tenga una producción más sostenible y eficiente para el medio ambiente, estudiando sitios de internet con iniciativas ambientales como resultados obtuvieron que industria cementera india ha avanzado hacia la sostenibilidad ambiental, integrando la innovación tecnológica, la eficiencia energética y la gestión responsable de recursos.

Asimismo, Olayinka et al., (2019) mencionaron que este tipo de industrias son encargadas de emitir polvo, por lo que en Nigeria realizaron una recolección de muestras de polvo dentro de una planta en 6 distintos puntos, estos polvos fueron analizados con un espectrofotómetro de absorción atómica y encontraron que contenían metales pesados, como el plomo (Pb), níquel (Ni) y manganeso (Mn), fueron altos, lo cual provoca problemas en los habitantes que viven cerca .

### ***Refinerías***

Las refinerías son instalaciones donde se procesa el petróleo crudo para la producción de otros derivados (gasolinas, querosenos, combustóleo). Un estudio realizado en Cataluña, España tuvo como objetivo la evaluación a la exposición ambiental a contaminantes provenientes de dicha industria para analizar sus concentraciones y el peligro para la humanidad, usando como metodología la recolección de muestras en zonas cercanas de estas instalaciones, dichas muestras fueron analizadas por un laboratorio, encontrando furanos y naftalenos, teniendo como resultado que la población más expuesta es la adulta y afecta las vías respiratorias (Ragothaman & Anderson, 2017).

En China se realizó un estudio en una refinería del norte de este país en donde se produce diésel, gas licuado, gasolina, coque de petróleo, entre otros. Este detalla un análisis de ciclo de vida en el proceso de la refinación e impacto ambiental. Los autores estudiaron el ciclo de vida sistemático del proceso de refinación de petróleo, que incluye la evaluación de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COVs), el complejo seleccionado tiene una capacidad de 7.5 millones de toneladas de crudo por año, como resultado se destaca que los impactos ambientales son; el cambio climático y la eutrofización del agua, siendo clave el craqueo, uso de materias y aguas residuales y el 14% del cambio climático proviene de las emisiones de COVs, sugiriendo su importancia en los estudios de gases de efecto invernadero (Y. Liu et al., 2020).

Para el estado de Rivers, Nigeria, se estudió la refinación artesanal con una alta concentración y actividad económica siendo que esto no solo afecta al entorno ambiental sino que también a la vida de las comunidades cercanas, su método fue una triangulación en donde se recolectaron datos con entrevistas y cuestionarios en Billie y Kegbara Dere, revelando que este proceso artesanal es contribuyente a la contaminación y efectos en la educación (Ogele & Egobueze, 2020).

En Cadereyta Jiménez, Nuevo León hay contaminantes originados de la refinería “Héctor R. Lara Sosa”, que han impactado en aguas subterráneas y superficiales, a partir del uso de fotointerpretación identificando fracturas y la recolección de muestras de agua superficial y subterránea que se analizaron los parámetros fisicoquímicos y concentraciones de contaminantes BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xilenos) teniendo que las concentraciones de benceno y tolueno superan lo establecido en las normas y que los contaminantes se desplazan al noroeste y sureste (De la Fuente, 2021).

### ***Petroquímica***

La petroquímica es la encargada de realizar procesos de transformación química de hidrocarburos, sus productos se componen primordialmente de carbón e hidrogeno (Secretaría de Energía, 2024).

Para América del Sur, especialmente en Colombia y Brasil, Fernández y colaboradores investigaron sobre la detección de bisfenol y 4 análogos para las emisiones atmosféricas de complejos petroquímicos que producen polipropileno, basándose en muestreos durante la fabricación de tres clases de polipropileno a través de la instalación de un tubo de acero con 20 orificios para analizarlo, parte de sus resultados, revelaron que encontraron concentraciones de bisfenoles que van desde 92 y 1565 ng g<sup>-1</sup>, dependiendo del tipo de polipropileno producido, Las emisiones de bisfenoles se liberan diariamente durante la producción, dispersándose en el aire sin control regulatorio, lo que aumenta la carga de contaminantes (Fernández et al., 2022).

En Texas, analizaron el área metropolitana específicamente en la zona de La Porte, siendo conocida por la concentración de instalaciones petroquímicas que son contribuyentes a las concentraciones de ozono (O<sub>3</sub>) y varios contaminantes atmosféricos. Realizando mediciones de hidrocarburos en un lapso 25 días, estos datos fueron comparados con emisiones vehiculares de Washburn, obteniendo que este tipo de industria tiene un significativo impacto en esta área con una mayor concentración de compuestos de eteno y propileno y se determinó que las emisiones vehiculares contribuyen a la contaminación atmosférica; sin embargo, las industriales tienen un efecto mayor en la calidad del aire (Jobson et al., 2004).

En México, esta industria ha experimentado un crecimiento constante, lo cual representa un avance positivo en términos económicos; sin embargo, dicho crecimiento también ha generado problemáticas ambientales que repercuten en la población y los ecosistemas, principalmente por el manejo inadecuado de los residuos tóxicos (Reyes, 2021).

### ***Minas***

La minería representa una actividad económica importante en Ghana, particularmente el oro, sin embargo, ha presentado desafíos socioambientales debido a la práctica ilegal en la región de Prestea, Ghana. Por ello, Mensah y colaboradores realizaron una investigación cualitativa en dos fases, la primera consistió en recolectar y revisar información sobre impactos y regulaciones,

mientras que en la segunda se aplicaron entrevistas grabadas para saber la perspectiva que tiene la población. En sus resultados encontraron una falta de cumplimiento en las regulaciones, lo que conlleva a que el suelo ya no sea fértil afectando directamente a la agricultura (Mensah et al., 2015).

Esta actividad tiene una gran relevancia en distintas regiones del mundo, ya que provee recursos esenciales para diversas industrias. Sin embargo, también genera impactos significativos en la salud de la población. Por esta razón, se han enfocado estudios en analizar los efectos de dicha actividad en zonas donde existen minas abandonadas, las cuales representan un importante foco de contaminación. Para ello, se aplicó una metodología con un enfoque multidisciplinario que integra la evaluación de riesgos, la toxicología ambiental y la epidemiología. A través de la revisión de literatura científica y de estudios de campo, se ha identificado una relación directa entre los niveles de contaminación y la presencia de problemas de salud en las comunidades cercanas, destacando concentraciones elevadas de mercurio tanto en el agua como en el suelo. (Candeias et al., 2018).

Un estudio realizado en México identificó una relación directa entre la contaminación por mercurio y la falta de regulaciones específicas sobre este contaminante en las zonas mineras. Para este análisis (Yarto 2004) realizaron revisión documental de informes y bases de datos de la Cámara Minera, se determinó que las descargas de mercurio provenientes de esta actividad superan las 2,000 toneladas anuales. Además, el estudio señala que en el país no existe ninguna norma que regule la contaminación del suelo por mercurio.

La minería en México ha recibido importantes inversiones extranjeras destinadas a la extracción de oro, actividad que ha generado diversos impactos ambientales. A través de una metodología documental basada en fuentes oficiales como el INEGI y la Secretaría de Economía se analizó el flujo de inversión extranjera en el sector, evidenciando que los trabajadores suelen laborar en condiciones poco favorables.

## ***Química y Papel***

A pesar de su importancia económica, esta industria se caracteriza por la generación de residuos y efluentes con presencia de sustancias tóxicas. En este contexto, se realizó un estudio en instalaciones de la industria de pulpa y de papel usando un enfoque multidisciplinario a partir de una revisión bibliográfica, en la que encontraron compuestos como dioxinas, fenoles y metales pesados. Asimismo, se analizaron varias plantas industriales donde se midieron las concentraciones de contaminantes, encontrando que los efluentes presentaban una alta carga, con un promedio de 2.5 toneladas por cada tonelada de papel producida (Mandeep et al., 2019).

En Polonia, se desarrolló un estudio enfocado en empresas certificadas que, además de cumplir con las regulaciones ambientales, mejoran sus procesos a través de la innovación tecnológica. Los autores realizaron 60 encuestas a las empresas certificadas en los sectores de producción de pulpa, papel y cartón, productos químicos, plásticos. Para el análisis de datos se utilizó el software SPSS, y los resultados indicaron que más del 53.3% del sector químico tienen buenas prácticas de gestión junto con la introducción de nuevas tecnologías o modificaciones de tecnologías existentes para reducir su impacto ambiental (Radonjić & Tominc, 2007).

## ***Fundición***

Šehić-Mušić y colaboradores realizaron en Bosnia y Herzegovina un estudio sobre la fundición de acero y hierro. Este representa más de 50% del consumo de energía dentro del sector industrial, y se caracteriza por emitir grandes cantidades de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y SO<sub>2</sub>, su metodología se basó en la compilación de datos sobre emisiones promedio de los hornos que son utilizados en esta práctica, realizando mediciones con equipos de recolección de filtros y gases para la limpieza de gases emitidos. En sus resultados identificaron que el uso de equipos no actualizados son los que contribuyen a la contaminación (Šehić-Mušić et al., 2013).

Ruberti (2024) abordó los desafíos ambientales asociados con la industria de la fundición, cuyos procesos dependen intensamente del consumo de agua y

energía, generando grandes cantidades de residuos. Para su estudio, se analizaron datos económicos de producción y ambientales disponibles en los informes de *Corporate Social Responsibility (CSR)* de diversas empresas. Se calculó un índice de manufactura común, se organizaron y homogeneizaron los datos de desempeño de diferentes fundidoras entre 2012 y 2021. Los resultados mostraron que, aunque la tecnología de la industria aumentó en un 400% en términos de patentes, las emisiones de tóxicos se incrementaron en un 239% y la generación de residuos en general en un 568%.

### **Cal y Vidrio**

En Baztán, España se concentra parte de la producción industrial relacionada con la cal y el vidrio, por la disposición de recursos como las rocas calizas y yesos, Mazadiego & Puche, (2006), utilizaron un método cualitativo que conlleva revisión bibliográfica y trabajo de campo revisando las caleras que existen, saber sobre su estado y funcionamiento, teniendo como conclusión que son ubicadas en puntos clave para la explotación de recursos y la degradación de ecosistemas.

## **2.3 Deterioro ambiental en México**

El deterioro ambiental es una de las consecuencias más graves del desarrollo industrial, y puede observarse a través de la contaminación del aire, suelo y del agua, así como la pérdida de ecosistemas. (Naturaleza, 2020).

En México, se evidencia un creciente deterioro ambiental debido a la contaminación atmosférica, así como a la explotación de los recursos naturales. Estos problemas, lejos de resolverse, se agravan con el paso del tiempo (Gobierno del Estado de México, 2021; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2018).

Leal et al., (2021) analizaron el desempeño ambiental, con la finalidad de que las empresas se orienten y consideren mejores decisiones en este tipo de problemáticas, La evaluación se realizó con base en indicadores de sostenibilidad y en el control de la contaminación. Para ello, se emplearon

modelos de regresión ponderada con el fin de analizar los niveles de derrames reportados por cada empresa a escala interurbana y metropolitana. Los resultados evidencian que la industria minera y las plantas termoeléctricas concentran los mayores niveles de emisiones contaminantes, constituyéndose como los principales focos de impacto ambiental.

Por su parte, Riojas-Rodríguez et al., (2013) estudiaron la situación del medio ambiente en el país, exponiendo como los ecosistemas han disminuido, y de los millones de toneladas de contaminantes que se emiten a la atmósfera, los cuerpos de agua, los residuos urbanos y cómo esto impacta en la salud humana.

En Veracruz existen cuatro centrales termoeléctricas, petroleras y petroquímicas, que emiten  $\text{SO}_2$  y dióxido de nitrógeno ( $\text{NO}_2$ ), de las cuales se han realizado diferentes estudios, como el de Rocha et al., (2016) quienes utilizaron la metodología de TELEDYNE T400, para determinar las concentraciones de ozono ambiental y obtuvieron como resultado que las mediciones registradas en las estaciones de Minatitlán y Xalapa durante el 2013-2015 de  $\text{NO}_2$ , ( $\text{O}_3$ ), ( $\text{SO}_2$ ) partículas finas diámetro  $\leq 2.5$  micrómetros ( $\text{PM}_{2.5}$ ) y partículas finas diámetro  $\leq 10$  micrómetros ( $\text{PM}_{10}$ ) van en constante cambio en virtud de algunos periodos se contempla que han superado los límites tanto de la OMS y los estándares mexicanos con concentraciones de 30, 22 y 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , por lo que, estas industrias infringen las normas oficiales, como la Norma Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-2011, que establece un límite permisible de 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (DOF, 2011).

Por su parte, Delgado et al., (2019) realizaron un estudio de zonas contaminadas en la Ciudad de México, su principal objetivo fue identificar aquellas zonas donde existe una probabilidad de que se encuentren metales pesados, para ello, se recolectaron 89 muestras de polvo urbano y midieron sus concentraciones. Aplicaron un método de interpolación (método kriging) para analizar zonas que tenían límites máximos permisibles a partir de la Norma Canadiense y para el cromo la Norma Oficial Mexicana. Como resultado, la zona más contaminada fueron las delegaciones Gustavo Madero,

Cuauhtémoc y Venustiano Carranza con altas concentraciones tóxicas que superan los límites canadienses y normas mexicanas.

Hernández Arellano (2020) escribió sobre las afectaciones en Atotonilco de Tula, Hidalgo y Apaxco, Estado de México tras la instalación de cementeras y caleras, generando un impacto en el entorno y a la población. Para ello, realizó una caracterización de la zona de estudio (población, economía, hidrología, clima, clasificación del uso de suelo, vegetación), asimismo, las industrias, sus emisiones y los conflictos que se han dado por las industrias, como parte de sus resultados menciona los problemas de salud que se han detectado en la población, como intoxicaciones, problemas respiratorios, leucemia, cáncer y enfermedades dermatológicas.

En el territorio mexicano se han clasificado regiones altamente contaminadas, por ejemplo, Azamar & Téllez- Ramírez (2021) menciona la “Caravana Toxitour México” que fue representada por especialistas, periodistas, ciudadanos, científicos y activista de países de Europa y Sudamérica, así como Europarlamentarias y académicos de México. El recorrido fue de más de 2,600 km, con inicio en el Salto en Jalisco, seguido de Guanajuato, Hidalgo, Estado de México, Puebla, Veracruz y Tlaxcala, donde los pobladores que se asientan en estos territorios sufren por la constante contaminación de ríos, bosques, acuíferos, generando diferentes tipos de cáncer en hígado, riñón, piel y estómago.

## **2.4 Índice de calidad del aire y sus impactos**

Las directrices mundiales de la OMS de la calidad del aire (DCA) son recomendaciones sobre los niveles óptimos de calidad del aire. Estas directrices destacan seis contaminantes clave, entre los que se incluyen las partículas suspendidas ( $PM_{2.5}$ ). Las partículas de tamaño de 10 y 2.5 micrómetros pueden ingresar a los pulmones y, en el caso de las más pequeñas, llegar al torrente sanguíneo, lo que puede ocasionar problemas cardiovasculares y respiratorios(OMS, 2021, 2024).

En tanto, la OMS (2018) señala que nueve de cada 10 personas en el mundo respiran aire contaminado, sin embargo, este se ve amenazado por la emisión de toxinas, provenientes de las industrias y los combustibles fósiles, lo que

ha llevado a la superación de los estándares de calidad del aire. La presencia elevada de partículas de polvo, gases y humo, derivada principalmente de estas fuentes, constituye un riesgo para la salud pública (Munsif et al., 2021).

Las industrias a nivel internacional son motivo de preocupación por la emisión de gases tóxicos en el aire y la contaminación de cuerpos de agua con sustancias como Ni, SO<sub>2</sub>, Mg y Cd.

La industria petroquímica y la refinación del petróleo es un principal problema de contaminación como lo muestran diversos trabajos, como el de Marqués, et al., (2020) quienes relacionan la proximidad de complejos industriales con diferentes enfermedades reproductivas.

Moretti et al., (2017) mencionan que las cementeras son importantes para el mundo, sin embargo, es necesario estudiar los impactos que pueden generar. Para ello, realizaron un análisis multicriterio en Italia de cuatro tipos de cementos grises, elaborados por cuatro cementeras diferentes, para ello, identificaron los efectos en la salud humana, encontrando que el riesgo a los químicos a los que se encuentran expuestos los trabajadores afectan gravemente a su salud, por lo que, es necesario el uso de medidas de protección y prevención (US EPA, 2016a). En este sentido, la “NORMA Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014, Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en el aire ambiente y criterios para su evaluación” menciona que los límites permitidos son de 10 µg/m<sup>3</sup> y para la OMS es de 5 µg/m<sup>3</sup>(DOF, 2014; OMS, 2021).

## **2.5 Métodos de regionalización**

Los clúster son análisis de datos que resuelven problemáticas de clasificación, es decir, ordenar (variables) en grupos (conglomerados) que tienen un grado de similitud, es un método estadístico que descubre estructuras de datos que no son visibles a simple vista (Villardón, 2007).

En Estados Unidos, se realizó un estudio en el que se abordó la problemática de responsabilidad ambiental de las empresas. Para ello se empleó una metodología que consistió en analizar geodatos sobre las emisiones tóxicas

reportadas por la EPA durante el período de 1994-2003, utilizando variables relacionadas con las emisiones, la producción, la solvencia, las características de la planta y de control. A partir del análisis de los cluster, se determinó que las emisiones de estas empresas crecieron entre un 5% a 9% (Akey & Appel, 2021).

Govender & Sivakumar (2020) abordaron la creciente preocupación por el deterioro de la calidad del atmosférica a nivel global, principalmente debido a actividades humanas, industriales, quemas de biomasa y emisiones vehiculares. Para ello, utilizaron métodos de análisis como k-means y agrupamiento jerárquico aplicados a datos de 1980-2019, clasificando los resultados en varias categorías: patrones temporales y espaciales de contaminantes, exposición y comportamiento. Los resultados mostraron que en Estados Unidos las regiones con concentraciones elevadas de  $PM_{2.5}$  presentaron valores altos en invierno y en el noroeste en verano, además, el análisis jerárquico reveló la relación entre los contaminantes y las condiciones meteorológicas.

Al norte de China, Tian et al., (2020) analizaron la situación de la contaminación atmosférica, aunque no es algo nuevo para ellos, dado a los graves problemas que han afectado a muchas regiones en las últimas décadas. En este contexto, la metodología utilizada se basó en un análisis de cinco contaminantes  $PM_{2.5}$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ ,  $CO$  y  $O_3$ , a partir de datos mensuales correspondientes al periodo 2016-2018, este análisis incluyó un agrupamiento y correlación de Pearson. Los resultados permitieron identificar ciudades con menores concentraciones de contaminantes en comparación con aquellas con industrias pesadas, las cuales presentan elevados índices de contaminación, además se observó una correlación significativa entre las  $PM_{2.5}$  y otros contaminantes tóxicos.

En Marruecos, Ghazi et al., (2020) llevaron a cabo un estudio sobre las concentraciones de dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), las cuales superan los límites permisibles establecidos por la OMS. Para ello, se realizaron mediciones en 14 sitios diferentes durante invierno y verano, además se realizaron consultas por enfermedades respiratorias en un lapso de 4 años, sus resultados

indicaron que el NO<sub>2</sub> se encuentra más alto en la zona centro, y detallaron que los grupos de edad de 15 y 49 años presentaron una mayor incidencia de enfermedades respiratorias.

En México, se han realizado trabajos con este enfoque, por ejemplo el de Hernandez-Flores et al., (2024)., en el Valle del Mezquital la acumulación de contaminantes afecta a la región por la industria, este estudio combinó la accesibilidad, análisis espacial y vulnerabilidad, resultando la presencia de tóxicos teniendo una mayor debilidad en la zona norte, se identificaron 41 localidades con índice alto socioambiental elevado. La correlación muestra que las comunidades más susceptibles son las que están expuestas a estos tóxicos.

En Tula, Hidalgo Elizondo-Pacheco et al., (2024), analizaron la contaminación del suelo, ya que esta región tiene emisiones industriales provenientes de una refinería y termoeléctrica. Para realizar este estudio, utilizaron métodos estadísticos: análisis de componentes principales, distribución de elementos y determinación de fuentes contaminantes, el análisis encontró que la contaminación en el suelo está asociada a condiciones naturales e industriales.

En tanto, Rangel et al., (2021) realizaron, un estudio en Silao Guanajuato, en la zona industrial Puerto Interior, que ha experimentado altos niveles de contaminación atmosférica por CO<sub>2</sub>, aplicando un modelo de dispersión gaussiano para estimar la distribución de tóxicos en distintos radios de distancia. Asimismo, se estudió la ubicación de una chimenea y recopilación de datos meteorológicos, resultando una variación en la concentración en trimestres de 2019-2020 teniendo la dispersión más alta a 3.9 km, de la chimenea medida en un modelo gaussiano de dispersión que estimo la acumulación de contaminantes y esto presenta un impacto ambiental a localidades cercanas.

### **3. Justificación**

México enfrenta serios desafíos ambientales debido a la industrialización, especialmente por la presencia de industrias como química y papel, minería, refinera, petroquímica, cal y vidrio, fundición, termoeléctricas y cementeras. La distribución geográfica de estas industrias, junto con la falta de una regulación ambiental, ha provocado que gran parte del país presenten problemas de contaminación a corto y largo plazo.

Esta situación se refleja en los niveles de contaminación atmosférica y sus consecuencias sobre la salud pública. De acuerdo con los registros de emisiones del año 2015, el 64% de los contaminantes provino del uso de combustibles fósiles y el 7% de la actividad industrial (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2018). Como resultado, las personas que viven cerca de industrias de contaminación, como fábricas y plantas industriales, están en mayor riesgo de desarrollar enfermedades respiratorias, cardiovasculares y neoplasias, entre otros impactos negativos, lo que subraya la importancia de realizar investigaciones que evalúen la distribución espacial de estas industrias.

En este contexto, el análisis de las industrias más contaminantes en México y su distribución geográfica es crucial para abordar los problemas ambientales del país. La identificación de las regiones más contaminadas, mediante un método de regionalización, permitirá una mejor comprensión de cómo las actividades industriales inciden de manera desigual en diferentes regiones que han sido identificadas, pero también de las que aún se desconocen sus problemáticas de contaminación ambiental por aire.

El presente estudio puede ser una herramienta de apoyo a instituciones públicas como la secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) o el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) para identificar las regiones con mayor número de industrias y que generan mayor contaminación en el territorio mexicano y monitorear estos sitios.

Este estudio también destaca las deficiencias en la calidad de la información del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) y

genera información importante sobre industrias no registradas que, a pesar de su omisión en los registros oficiales, tienen un impacto negativo de contaminación ambiental. Esta información podría ser fundamental en el monitoreo de actividades industriales, al proporcionar una visión más completa y precisa de la distribución de las industrias contaminantes y sus contribuciones de forma regional por la emisión de materia particulada ( $PM_{2.5}$ ).

Este estudio se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 13 (Acción por el Clima) y 15 (Vida de ecosistemas terrestres), al abordar la problemática de la contaminación atmosférica y sus repercusiones sobre el equilibrio ambiental. La emisión de contaminantes al aire contribuye al cambio climático y afecta la salud de los ecosistemas, alterando la calidad del suelo, la vegetación y la biodiversidad. Analizar estos impactos permite generar información útil para la mitigación de emisiones y la conservación de los ecosistemas, promoviendo acciones sostenibles en concordancia con los compromisos de la Agenda 2030.

Este fenómeno es consecuencia principalmente del incremento de los gases de efecto invernadero, entre los cuales destacan los generados por el sector industrial. Por ello, resulta fundamental identificar las regiones con mayores niveles de contaminación ambiental.

## **4. Hipótesis**

La ubicación geográfica de las industrias contribuye con los niveles de contaminación por PM2.5, y la aplicación de herramientas SIG mediante un método de clúster permitirá identificar y analizar de manera precisa las regiones con mayor concentración de contaminación atmosférica.

## 5. Objetivos

### 5.1 Objetivo general

Analizar la distribución espacio-temporal de la contaminación atmosférica por industrias a través de un método clúster para la identificación de regiones expuestas en México.

### 5.2 Objetivos específicos

1. Revisar información y fuentes oficiales del sector industrial en México para identificar posibles impactos ambientales derivados de su actividad.
2. Estructurar y procesar la información de las bases geoespaciales (DENUE y Google Maps) mediante la clasificación de los tipos de industrias activas en México durante 2013-2020, para generar su georreferenciación y corrección espacial.
3. Clasificar las industrias con mayor potencial de contaminación en México, considerando el número de personal ocupado y el tipo de industria, para determinar aquellas con mayor producción y posible impacto ambiental atmosférico.
4. Modelar la materia particulada ( $PM_{2.5}$ ) utilizando la herramienta *Earth Trends Modeler* para analizar su comportamiento espaciotemporal durante 1998-2020, y generar regionalizaciones mediante el método de clúster.
5. Analizar la contaminación por  $PM_{2.5}$  a partir de la regionalización y la distribución espacial de las industrias para identificar regiones críticas de contaminación atmosférica como un aporte en la mejora de toma de decisiones.

## **6. Marco – Teórico metodológico**

### **6.1 Regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental (RESA's)**

“Las Regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental son definidas como las áreas dentro del territorio nacional en las que coinciden geográficamente, actividades agrícolas, extractivas, manufactureras, que representan un riesgo al ambiente y a la salud humana” (Azamar-Alonso & Téllez-Ramírez, 2021).

La clasificación de estas zonas se realizó considerando que acumulaban más de 15 años de denuncias documentadas provenientes de la población, colectivos y organizaciones sociales (comunidades, pueblos) y por la colaboración e identificación de problemáticas ambientales por parte de instituciones como SEMARNAT, secretaria de la salud y CONAHCYT. Actualmente solo existen 8 RESA's en México localizadas en la parte centro del país, occidente y Veracruz (Azamar-Alonso et al., 2021; Universidad Autónoma de México, 2023).

### **6.2 Deterioro ambiental**

Se entiende que el deterioro ambiental no es un proceso natural, sino que también implica la disminución de las funciones ecológicas del ambiente como resultado de la destrucción causada por actividades antropogénicas (Kashiwada, 2020) como lo es la sobrepoblación, el crecimiento industrial que emiten y vierten, la deforestación del medio ambiente (Twenergy, 2020). Existen otras alteraciones en los ecosistemas por las actividades humanas como lo es la sobrepoblación, el constante crecimiento de las industrias que emanan gases tóxicos, la deforestación de ecosistemas habitables (Twenergy, 2020). Este deterioro se da por la limitada capacidad del ambiente de satisfacer las necesidades del ser humano, como el agotamiento de los recursos naturales (Sánchez, 2019).

Esto es un problema internacional y uno de los más preocupantes del siglo XXI, ya que afecta de manera ambiental, social y económica (Lee et al., 2024), constituyendo una amenaza significativa para la salud humana.

## **6.3 Industria**

Este concepto es ambiguo, sin embargo, algunos autores mencionan que es una actividad socioeconómica que se produce en una fábrica colectiva a escala mayor en plantas, que ha tenido una evolución, y se dividen en tres (primarias, secundarias y terciarias). En general, se transforman las materias primas en productos (Euroinnova, 2021).

La industria se divide en dos categorías principales: la industria pesada, enfocada en la fabricación de maquinaria y energía, la industria ligera, que emplea productos semielaborados para la producción de bienes como automóviles y electrodomésticos. Los productos semielaborados son los que se venden a otras industrias para que los utilicen en otro proceso y los elaborados son los que ya son utilizados para un uso final (Melià Seguí & Tuset Peiró, 2018).

### **6.3.1 Procesos en termoeléctrica**

Es un establecimiento en donde se produce energía, a partir del vapor que se forma al momento de hervir el agua en calderas, a una alta presión. En estas industrias se hace uso del carbón, gas natural y combustóleo (Foro Nuclear, 2020), además de combustibles fósiles, por lo que, se genera contaminación del aire y la escasez de los recursos, hasta ahora es la más usada en el mundo (Portillo, 2021).

Los generadores de la energía se fundamentan del efecto Seebeck que son los que transforman la energía térmica en la eléctrica (Jaziri et al., 2020).

La figura 1, muestra de manera secuencial y esquemática, los principales procesos que ocurren dentro de una planta termoeléctrica, en la cual se transforma la energía química contenida en los combustibles fósiles en energía eléctrica lista para su distribución y consumo.

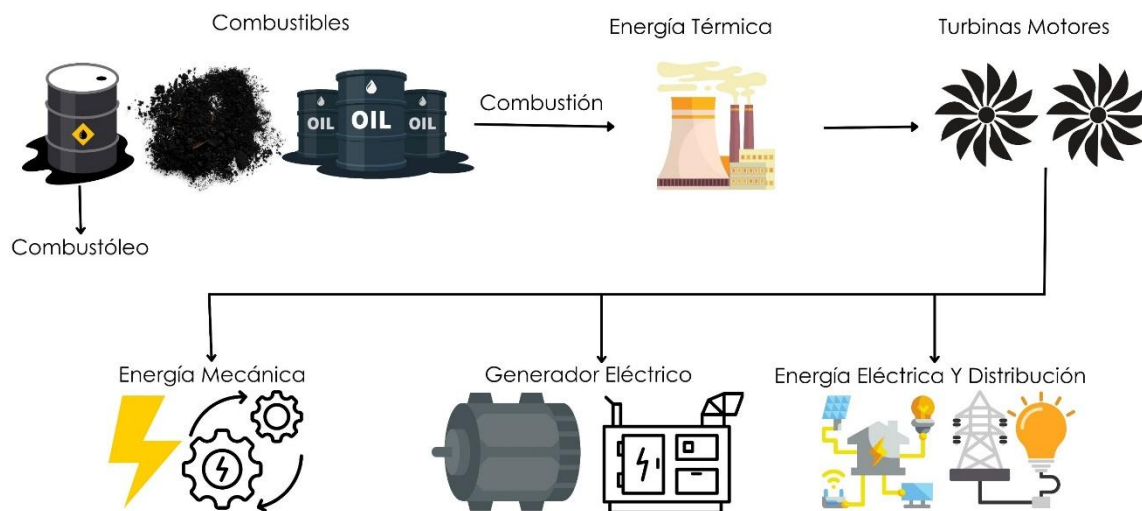
El proceso comienza con el combustóleo, un derivado pesado del petróleo que se utiliza como combustible primario en este tipo de instalaciones. Este combustible se almacena en grandes tanques y constituye la fuente de energía inicial.

Posteriormente, el combustóleo, junto con otros combustibles fósiles como el carbón o el petróleo, se somete a un proceso de combustión dentro de calderas o cámaras de combustión. Durante esta etapa, la energía química del combustible se transforma en energía térmica (calor). La combustión genera gases a muy alta temperatura, los cuales se emplean para calentar agua y producir vapor a presión.

El vapor de alta presión generado se conduce hacia las turbinas motrices, donde su fuerza impulsa las palas de las turbinas, produciendo así energía mecánica de rotación. Este paso representa la conversión de la energía térmica en energía mecánica.

La energía mecánica obtenida en las turbinas se transfiere al generador eléctrico, un dispositivo que convierte el movimiento rotatorio en energía eléctrica mediante un proceso de inducción electromagnética. En esta etapa, la energía mecánica del eje de la turbina se transforma en corriente eléctrica alterna, la cual constituye la base del suministro eléctrico.

Finalmente, la energía eléctrica producida se envía a los sistemas de distribución, donde es transformada, regulada y transmitida a través de redes de alta tensión para su consumo en hogares, industrias, comercios y servicios públicos (Dene Consultoria & SENA, 1999).



*Figura 1: Procesos que se llevan a cabo en una planta termoeléctrica. Elaboración propia con información de la guía ambiental para termoeléctricas y procesos de cogeneración parte aire y ruido, (Dene Consultoria & SENA, 1999).*

### 6.3.2 Sector cementero

Las cementeras se encargan de la producción de cemento, un material en forma de polvo seco, que sirve para la elaboración de concreto, esta industria en México es de las más esenciales por su producción, encontrándose dentro de los 15 principales productores del mundo (De la Garza & Arteaga, 2011; Vásques & Corrales, 2017).

El cemento es un material ocupado en la construcción, obtenido a través de la combinación de arcilla, caliza y dióxido de silicio (Holcim, 2024).

La Figura 2 muestra la cadena completa de transformación del material natural en cemento, un proceso que combina operaciones físicas, térmicas y químicas altamente precisas.

Todo inicia con la extracción de las materias primas, principalmente piedra caliza, arcilla, arena y mineral de hierro, las cuales aportan los componentes

químicos necesarios. Estas se obtienen mediante minería a cielo abierto y se trasladan a la planta cementera para su procesamiento.

Una vez en la planta, los materiales se someten a un proceso de trituración, donde se reducen a fragmentos pequeños. Después, se realiza una mezcla previa para asegurar una composición química uniforme. Posteriormente, esta mezcla pasa a la molienda de crudo, donde se pulveriza hasta obtener una harina fina y homogénea, la cual se introduce en un horno rotatorio para su calcinación. En esta etapa, el carbonato de calcio se descompone, preparando el material para la siguiente fase del proceso.

El material calcinado se somete a temperaturas de hasta 1,450 °C, generando el clínker, pequeños nódulos grises que contienen los compuestos responsables de las propiedades del cemento. Tras su enfriamiento, el clínker se mezcla con yeso y, en algunos casos, con otros aditivos minerales, para luego someterse a una nueva molienda, obteniendo así el cemento en polvo.

Finalmente, el cemento terminado se envasa o almacena a granel para su distribución y comercialización. De esta manera, el proceso transforma los recursos minerales en un producto esencial para la construcción, mediante una cadena de operaciones físicas, térmicas y químicas cuidadosamente controladas (Cemex, 2023).



Figura 2. Procesos de fabricación del cemento. elaboración propia con base en la información de (Cemex, 2023).

### **6.3.3. Procesos de refinación**

Las refinerías son plantas productoras que contiene sistemas de procesamiento, en las que el petróleo crudo se convierte en productos, como gasolina, gas LP, gasóleo, combustible pesado, diésel y asfalto que satisfacen las necesidades de la población (Gobierno de México, 2016).

La refinería recibe petróleo crudo de campos de extracción, el cual es sometido a procesos de calentamiento y tratamiento para obtener diversos derivados. Este crudo contiene una gran variedad de compuestos, incluyendo gases, lubricantes y combustóleos. Este último ha sido prohibido en diversos países debido a la concentración de azufre y otros contaminantes tóxicos, los cuales generan emisiones para la atmósfera como para los cuerpos de agua (Dickinson, 1986). Sus instalaciones se asocian por su configuración y las condiciones geográficas, encontrándose en lugares estratégicos para distribuir sus productos (Gobierno de México, 2016).

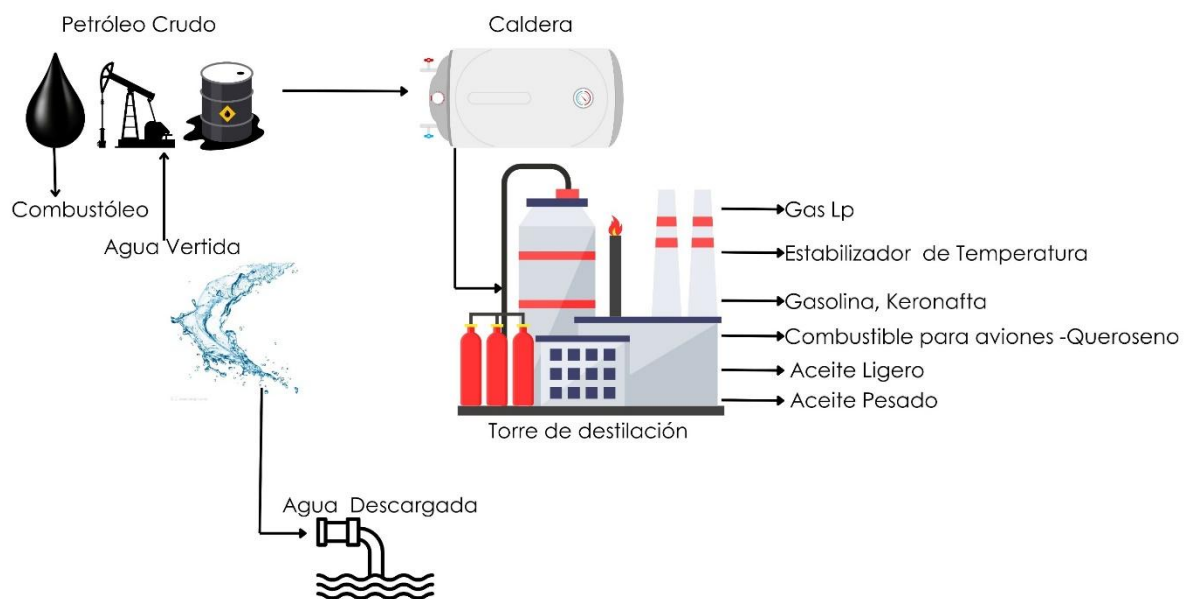
El combustóleo es el resultado del proceso de la refinación del petróleo crudo, es utilizado para la generación de electricidad, las refinerías lo utilizan en los calentadores a un fuego directo, se mantiene a altas temperaturas, México. 2020).

La figura 3 muestra de manera esquemática los procesos que se llevan a cabo en una refinería de petróleo. El diagrama inicia con la extracción del petróleo crudo, el cual es transportado hacia la caldera, donde se somete a un proceso de calentamiento para alcanzar las condiciones adecuadas de temperatura. A partir de este punto, el crudo caliente se introduce en la torre de destilación, donde se separa en diferentes fracciones según su punto de ebullición.

En la parte superior de la torre se obtienen los productos más ligeros, como el gas LP, seguidos por el estabilizador de temperatura y las fracciones intermedias, que incluyen gasolina y kero-nafta. En niveles más bajos se condensan productos más pesados como el combustible para aviones (queroseno), el aceite ligero y finalmente el aceite pesado, que representa una de las fracciones más densas del proceso.

Durante este procedimiento también se generan residuos, entre ellos agua vertida y descargada, proveniente de los procesos de enfriamiento y lavado de los equipos, que contienen trazas de hidrocarburos y requiere tratamiento antes de su disposición. Asimismo, del proceso de refinación se deriva el combustóleo, un subproducto de gran densidad que puede ser reutilizado como combustible industrial.

En conjunto, la figura 3 ilustra la cadena de transformación del petróleo crudo en derivados energéticos útiles, destacando la importancia de la separación térmica y la gestión de los residuos líquidos generados en las etapas de refinación (Horiba, en prensa).



*Figura 3. Procesos realizados en una refinería. Elaboración propia con base en la información de (Horiba, en prensa).*

### **6.3.3.1. Producción total**

La producción total es la capacidad de procesos de refinación y conversión de crudo en productos químicos, gasolinas, diésel y combustóleo (Alabdullah et al., 2020).

#### **6.3.4. Procesos petroquímicos**

La industria química que hace sus procesos con derivados del gas natural y petróleo, los cuales los transforma en materias primas (Gobierno de México, 2016).

Los productos petroquímicos se obtienen a partir de la extracción de sustancias químicas derivadas de los combustibles fósiles, principalmente el gas natural y el petróleo. A través de procesos industriales, estos combustibles se transforman en una amplia variedad de productos químicos utilizados en diversas industrias, como la plástica, farmacéutica, textil y alimentaria. Existen dos tipos principales de petroquímicas: las basadas en gas natural y las que se derivan del petróleo, las petroquímicas a base de gas natural producen principalmente etileno, propileno y metanol, mientras que las petroquímicas a base de petróleo se enfocan en productos como el benceno, tolueno y xilenos, que son la base de numerosos compuestos utilizados en la fabricación de plásticos, detergentes, y otros productos industriales (Laub-Benavides & Pomatailla-Gálvez, 2024).

Esta industria se identificó por ser la más reciente en el uso de hidrocarburos, surgió a partir de la industria del carbón mineral y la química clásica, que aparecieron antes de comenzar la primera guerra mundial (Díaz-Carvajal, 1985).

#### **6.3.5. Procesos de la minería**

Son las excavaciones realizadas dentro de una mina, en ellas se explotan los yacimientos y se consiguen minerales convenientes, existen minas a cielo abierto, minas subterráneas (interior) y explotaciones por sondeo (Herrera Herbert, 2017).

La minería es la extracción de los materiales mineros, que son formados por los procesos naturales (secretaría de Economía, 2012). En la figura 4 se presentan los dos principales métodos de explotación minera utilizados para la obtención de recursos minerales: la mina a cielo abierto y la mina subterránea. Cada una de estas modalidades se aplica según la profundidad

del yacimiento, las condiciones del terreno y las características geológicas del depósito mineral. Estas diferencias determinan no solo la forma de extracción, sino también el tipo de infraestructura, la intensidad del impacto ambiental y las etapas operativas involucradas en el proceso.

La mina a cielo abierto se caracteriza por la remoción de grandes volúmenes de material superficial mediante técnicas como el dragado, los tajos abiertos o los métodos mixtos. En este tipo de minería, las fases principales incluyen la preparación del terreno, el arranque y acopio del material y posteriormente la transformación de la roca para separar los minerales útiles. Una vez agotada la fuente de extracción, el sitio entra en la etapa de abandono de la mina, en la cual deben aplicarse medidas de restauración ambiental.

Por otro lado, la mina subterránea se desarrolla bajo la superficie terrestre, utilizando métodos como el derrumbamiento por bloques, los tajos largos o las cámaras, que permiten acceder a los depósitos más profundos (Guía Minero Ambiental, 2010).

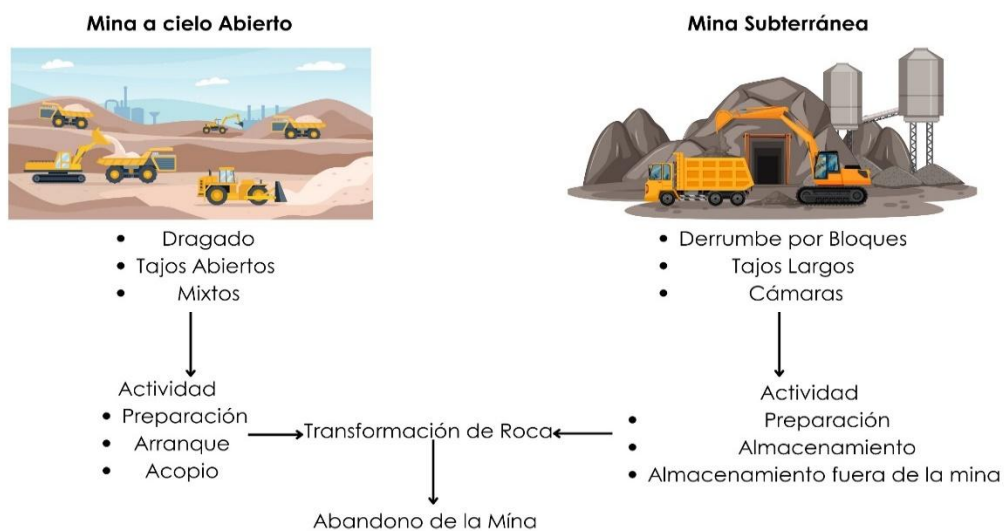


Figura 4. Tipos de minas. Elaboración propia con base en la información de (Guía Minero Ambiental, 2010).

### **6.3.6. Proceso en la industria de química y papel**

La industria química es altamente competitiva a nivel global, destacándose especialmente en la producción de materias primas clave como el amoníaco, que tiene una gran demanda debido a su uso en la fabricación de productos farmacéuticos, fertilizantes y otros productos químicos esenciales (Suárez, 2004). Esta industria se caracteriza por llevar a cabo transformaciones químicas a gran escala, a través de la extracción y procesamiento de diversas materias primas. Se clasifica en dos grandes ramas: la química básica, que está asociada con la producción de materias primas, y la química de transformación, que se encarga de producir productos semielaborados.

Por otro lado, el sector del papel está centrado en la fabricación de papel y cartón, un proceso que contribuye al agotamiento de los recursos naturales debido a la deforestación y la degradación del suelo (Villanueva-Regidor, 2011). Produce el agotamiento de los recursos, debido a la deforestación de bosques y la degradación del uso de suelo. Para la producción de este material se utilizan árboles de coníferas, se blanquean las fibras de la madera utilizando dióxido de cloro y gas de cloro, y en un 4% es consumidor de energía eléctrica en el mundo (Vega-Barrera, 2014).

La figura 5 muestra de forma esquemática los procesos industriales que intervienen en la fabricación de papel, evidenciando la relación entre la industria química y papelera.

El proceso inicia con la recolección de materia prima, proveniente de bosques o plantaciones, que es transportada hacia la planta de procesamiento. Una vez en la instalación, la madera se deposita en el patio de bagazo, donde se acumula y acondiciona antes de pasar a la banda de alimentación. En esta etapa, el material es conducido hacia una zaranda, que separa las impurezas y regula su tamaño para asegurar una alimentación uniforme hacia la caldera, la cual genera el vapor y la energía necesarios para las siguientes fases.

Posteriormente, el material pasa al proceso de cocción, donde se mezcla con productos químicos para disolver la lignina y separar las fibras de celulosa.

La mezcla resultante se somete a un lavado que elimina residuos y da origen a la pulpa café. Esta pulpa se depura para retirar partículas sólidas e impurezas, y luego pasa por las etapas de blanqueo, donde se aplican agentes químicos que transforman la pulpa en pulpa blanca, base esencial del papel.

Una parte importante del procedimiento corresponde a la recuperación de químicos, proceso mediante el cual se reutilizan reactivos y subproductos, reduciendo costos e impactos ambientales. Finalmente, la pulpa blanca es alimentada en una máquina para fabricar papel, que convierte las fibras en láminas continuas. Estas son secadas, prensadas y enrolladas para formar los rollos de papel listos para su distribución y uso comercial.

En conjunto, la figura resalta la importancia de la eficiencia productiva y la sostenibilidad ambiental dentro del proceso industrial, donde la integración entre la química y la tecnología papelera permite optimizar recursos y minimizar residuos (Martínez Aguilar, en prensa).

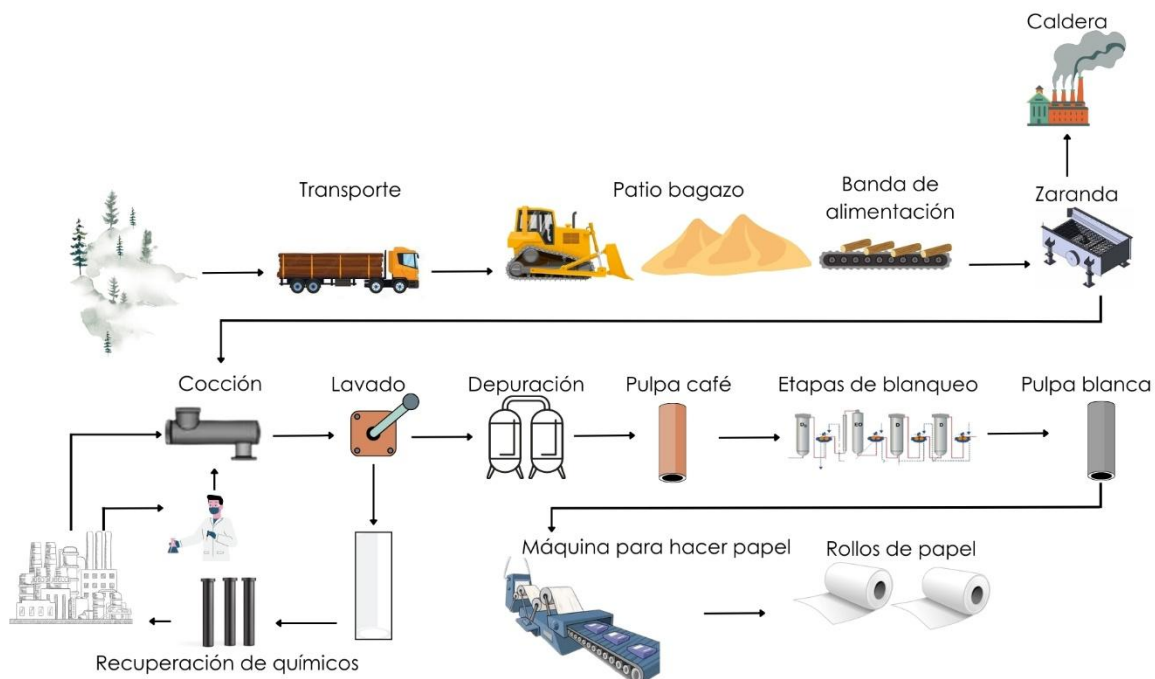


Figura 5. Procesos realizados para la fabricación de la industria de química y papel. Elaboración propia con base en la información de (Martínez Aguilar, en prensa).

## 6.4 Material Particulado

Son partículas sólidas y gotas que se localizan en la atmósfera (EPA, 2024), su composición es diferente y algunos componentes que se localizan en ellas son: nitratos, amoníaco, sulfatos, cloruro sódico, carbón, cenizas metálicas y polvos minerales (Instituto para la Salud Geo ambiental, 2024) (Figura 6).

Las partículas se clasifican por su tamaño, como las  $PM_{10}$  que son partículas gruesas, menores a 10 microgramos (Canales-Rodríguez et al. 2014), y las  $PM_{2.5}$  son las más finas son principales fuentes de chimeneas y obras de construcción (EPA, 2024). En la figura 6, se describe el tamaño de diámetro menor de 2.5 micras, lo que es perjudicial a la salud, pudiendo permanecer durante un largo tiempo en el cuerpo humano transportándolo por medio de la inhalación y adentrarse en el sistema respiratorio.

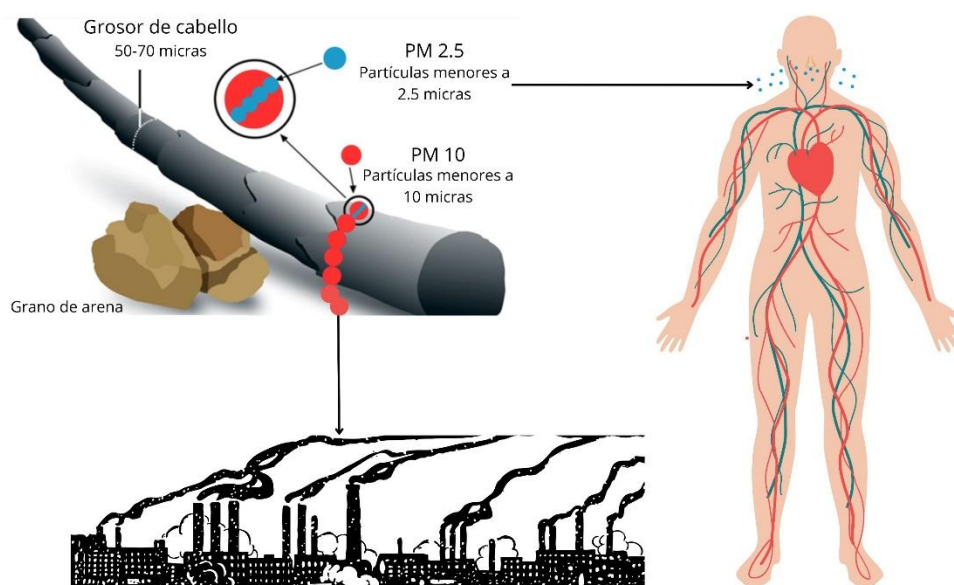


Figura 6. Esquema de materia particulada<sub>2.5</sub>. Elaboración propia con base a la información de (US EPA, 2018)

## 6.5. Método de regionalización (Clúster)

Para generar la agrupación de datos por  $PM_{2.5}$  se utilizó el método de regionalización clúster, debido a que es un conjunto de componentes con singularidad agrupados por su proximidad, esto tiene como objetivo la búsqueda de patrones y relaciones que no se observan, siendo facilitadores

para su análisis y clasificación, siendo pieza fundamental para aplicaciones como el analizar un comportamiento, detectar anomalías (Villardón, 2007).

La ecuación 1 representa la distancia euclidiana, la cual se expresa como:

$$\begin{aligned} d(x_1, x_2) &= \|x_1 - x_2\| \\ &= \left\{ \sum_{i=1}^N (x_{1i} - x_{2i})^2 \right\}^{1/2} \end{aligned} \quad \text{Ec. 1}$$

En la ecuación 1,  $x_1$  y  $x_2$  son dos píxeles cuyas bandas espectrales se comparan, y  $N$  indica el número de componentes

Esta distancia calcula la raíz cuadrada de la suma de las diferencias al cuadrado entre los valores espectrales de ambos píxeles.

Mide la longitud o separación real entre dos puntos en el espacio multiespectral, siendo muy útil para identificar similitudes precisas entre objetos o superficies, aunque su cálculo sea computacionalmente más costoso. (Alan & Jia, 2006).

Donde:

$X_1$ : Punto 1 con similitudes

$X_2$ : Punto 2 con similitudes

$N$ : Número de componentes espectrales

## 7. Metodología

El desarrollo del trabajo comprendió cinco etapas, iniciando por el tratamiento de información hasta los procesos de regionalización para obtener la distribución espacial de la contaminación por  $PM_{2.5}$  y su relación con la ubicación de las industrias de mayor contaminación. A continuación, se muestra el esquema metodológico general (Figura 7).



Figura 7. Esquema metodológico

## 7.1 Zona de estudio

La zona de estudio (figura 8) abarca los 31 estados de la República Mexicana y la Ciudad de México, con una población total de 126,014,024 habitantes (INEGI, 2020).

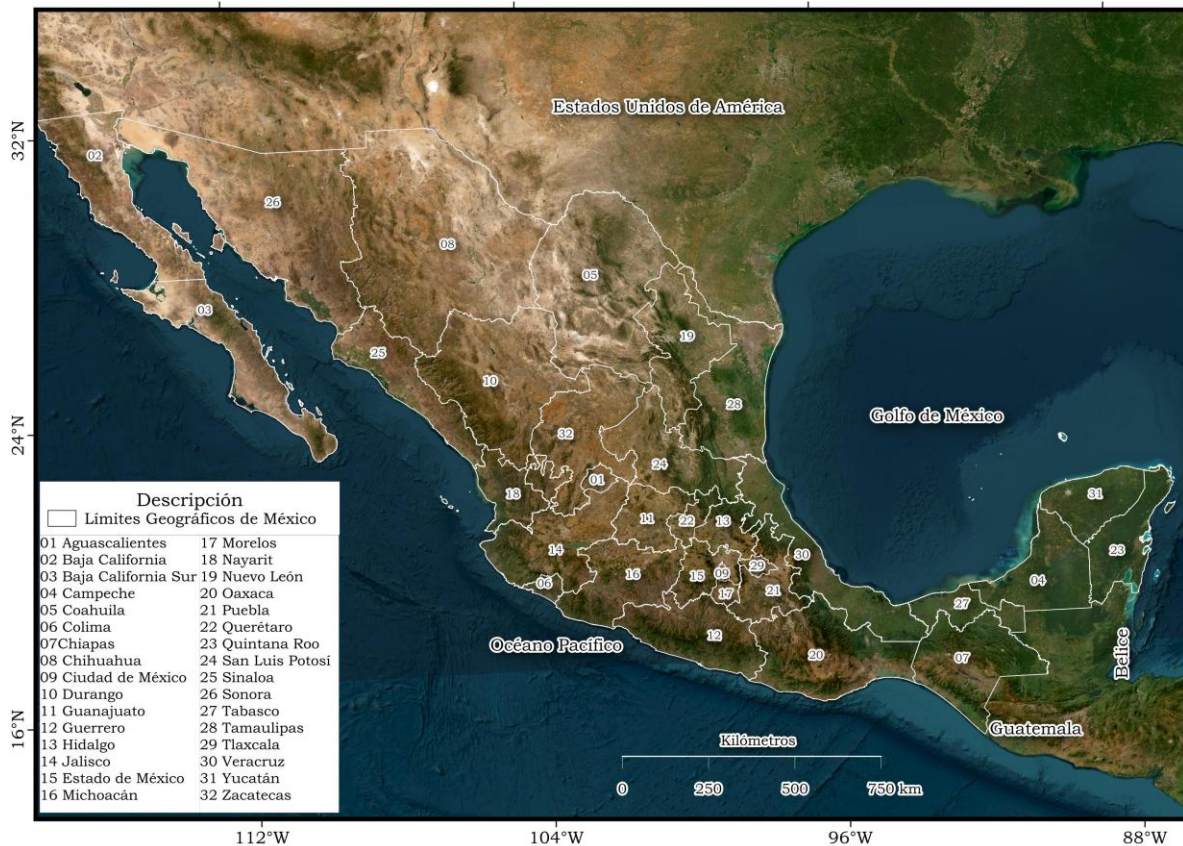


Figura 8. Zona de estudio

El área de estudio limita en el norte, con Estados Unidos de América, y al sur con Belice y Guatemala, rodeado por el Golfo de México al este y el Océano Pacífico al oeste. Sus coordenadas extremas son:  $32^{\circ} 43' 06''$ ,  $14^{\circ} 32' 27''$ ,  $86^{\circ} 42' 36''$  y  $118^{\circ} 27' 24''$ .

## 7.2 Recopilación de fuentes bibliográficas

Como primera etapa, se llevó a cabo la búsqueda bibliográfica sobre los complejos industriales a nivel internacional y nacional, así como la identificación de las Regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental a partir de sus condiciones ambientales, incluyendo la calidad del aire. Esto permitió conocer las características de los tipos de industria de mayor contaminación

y la identificación de los procesos que se llevan a cabo durante su producción, que contribuyen a una mayor emisión de contaminantes a la atmósfera, esta revisión se efectuó en fuentes oficiales (informes, artículos, bases de datos oficiales, publicaciones académicas, reportes de organizaciones internacionales).

Uno de los principales enfoques de esta investigación fue la caracterización de las Regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental, establecidas a partir de los niveles de contaminación por material particulado 2.5 (PM<sub>2.5</sub>), dado que este componente de tóxicos es uno de más dañinos para la población y el medio ambiente. Se identificaron los principales factores que contribuyen a la formación y acumulación de PM<sub>2.5</sub> en la atmósfera, considerando las industrias y otros factores antropogénicos.

Asimismo, se indagó en la evaluación de los sectores industriales con mayor impacto ambiental, tales como la industria petroquímica, metalúrgica, química, energética. Examinando los procesos de producción e identificando aquellas que generan mayores emisiones de contaminantes, por el uso activo de combustibles fósiles, quema de materiales, liberación de compuestos químicos o la inadecuada gestión de residuos.

### **7.2.1 Identificación de industrias**

Los datos geospaciales de industrias se obtuvieron de la base de datos del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) (<https://www.inegi.org.mx>) del periodo 2013-2020, estas bases de datos se estructuraron a partir de la selección del tipo de industria y el personal ocupado. Como una forma de obtener un inventario completo, se apoyó de la plataforma Google Maps para verificar la existencia y ubicación de las industrias.

Las industrias seleccionadas se identificaron por ser consideradas las de mayor contaminación (De la Mora, 2012; Lin & Zhang, 2016; Mahasenan et al., 2003), por los procesos que llevan a cabo en su industrialización, como

resultado de esta primera revisión se identificaron las siguientes ver (Tabla 1):

*Tabla 1. Claves de Industrias*

| <b>Clave de industrias</b> |   |                    |
|----------------------------|---|--------------------|
| <b>Industria</b>           | <b>Nombre</b>                             | <b>Clave DENUÉ</b> |
| <b>Eléctrica</b>           | Termoeléctrica                            | 221111             |
| <b>Metal</b>               | Fundición                                 | 331111-331520      |
| <b>Minera</b>              | Minería                                   | 212110-212399      |
| <b>Química</b>             | Refinerías, Petroquímica, Química y Papel | 322110-326290      |
| <b>Cementera</b>           | Cementeras, Cal y Vidrio                  | 327111-327410      |

### **7.3 Procesamiento de la base de datos DENUÉ**

A partir de la base de datos del DENUÉ, se registraron las actividades socioeconómicas utilizando una clave única asignada a cada una que incluyen los sectores (termoeléctrica, petroquímica, refinería, cementera, química y papel, cal y vidrio, minas y fundición), la estructura consistió en acumular los datos que se tenían de 2013-2020 para considerar el tiempo de funcionamiento de las industrias, debido a que los impactos pueden ser a largo plazo.

Para el procesamiento de datos se identificaron los sectores industriales que registran una mayor emisión de vapores o aerosoles emitidos a la atmósfera, donde diversas investigaciones (Adebiyi, 2022; Alarcon-Ruiz et al., 2023; Dubey, 2013; Park et al., 2012b; Pierard et al., 2019; Shen et al., 2017) señalan a la refinería, termoeléctrica y petroquímica como las que contribuyen en grandes cantidades de gases de dióxido de carbono y otros de efecto invernadero, sin omitir, a la industria de la construcción (minas y cementeras) que son destacadas por la emisión de partículas finas y el azufre.

Los geodatos se descargaron en un formato de valores delimitados por comas (\*.csv), lo que permitió su manejo en herramientas de análisis de datos. Posteriormente, se importó a un sistema gestor de base de datos, donde se

realizó el filtrado de industrias con un tamaño de trabajadores mayor a 51, equivalente a industria mediana y grande según la (Tabla 2).

Permitiendo así obtener un conjunto de datos más específico para el análisis. El filtrado por tamaño de población industrial ayudó a concentrar en aquellas industrias con mayor impacto ambiental, descartando aquellas de menor escala cuya contribución de emisiones es menor.

Asimismo, del grupo de personal ocupado se consideró el tamaño e infraestructura, y nombre de la actividad (primaria, secundaria y terciaria). En este caso, se seleccionaron las actividades secundarias que contempla la transformación de materias primas a productos finales como la industria cementera. Estas actividades se dividen en 20 sectores económicos, por lo que dio revisión a la base de datos a nivel estatal, para posteriormente depurar 6,058,548 establecimientos registrados inicialmente.

La depuración consistió en la obtención de los geodatos de las 32 entidades federativas del país, posteriormente se seleccionaron únicamente las industrias más contaminantes a través de las claves dentro del DENU. Con este primer filtro, se obtuvieron 59,870 (0.98%) industrias de los 6 millones que se tenían inicialmente.

Asimismo, fue necesario eliminar los registros relacionados con oficinas, establecimientos de compra y venta, lo que dio como resultado un total de 1,440 industrias.

*TABLA 2. SECTORES DE PERSONAL OCUPADO*

| <b>Personal Ocupado</b>   | <b>Tamaño de Industria</b> |
|---------------------------|----------------------------|
| <b>0 a 5 Personas</b>     | Micro                      |
| <b>6 a 10 Personas</b>    | Micro                      |
| <b>11 a 30 Personas</b>   | Pequeña                    |
| <b>31 a 50 Personas</b>   | Pequeña                    |
| <b>51 a 100 Personas</b>  | Mediana                    |
| <b>101 a 250 Personas</b> | Mediana                    |
| <b>251 y más Personas</b> | Grande                     |

Al observar la Tabla 2, y con base en los criterios recomendados por la Unión Europea, el INEGI categorizó las industrias según el número de personas

ocupadas, clasificándolas como micro, pequeñas, medianas o grandes (INEGI, 2015).

*Tabla 3. Número total de industrias seleccionadas*

| <b>Industria</b>       | <b>Total</b> | <b>Porcentaje</b> |
|------------------------|--------------|-------------------|
| <b>Química y Papel</b> | 1064         | 73.89             |
| <b>Minas</b>           | 150          | 10.42             |
| <b>Cal y Vidrio</b>    | 111          | 7.71              |
| <b>Fundición</b>       | 44           | 3.06              |
| <b>Cementeras</b>      | 36           | 2.50              |
| <b>Termoeléctricas</b> | 21           | 1.46              |
| <b>Petroquímicas</b>   | 8            | 0.56              |
| <b>Refinerías</b>      | 6            | 0.42              |
| <b>Total</b>           | 1440         | 100               |

Como parte de este procedimiento se descartaron 6,057,108 (100%) datos, dejando para su tratamiento y especialización 1,440 (0.024%) industrias registradas en todo el país (Tabla 3), con sus coordenadas (latitud y longitud), esto permitió verificar su ubicación precisa y, en los casos necesarios, realizar ajustes para corregir la localización y el tiempo de funcionamiento, cabe mencionar que hubo industrias que no fueron identificadas en la plataforma por lo que se requirió realizar una búsqueda independiente por cada giro industrial y tener más completa la información.

El inventario por industria se integró a un Sistema de Información Geográfica (QGIS), para visualizar la distribución espacial de los corredores industriales, y analizar de forma exploratoria si estos coinciden con la RESA's identificadas o reconocer otras regiones que aún no sean declarado.

Asimismo, se analizó la información disponible de PEMEX de la página oficial del Gobierno de México (<https://www.datos.gob.mx/busca/dataset?tags=produccion>) con la finalidad de examinar la producción total de cada refinería instalada en territorio nacional.

Los procesos de análisis espacial y modelado se llevaron a cabo en el software TerrSet, el cual permitió integrar diversas capas de información geográfica para evaluar los cambios en el territorio. A través de sus herramientas de

procesamiento y modelado, se realizaron operaciones de clasificación, análisis multicriterio y simulación de serie de tiempo, facilitando la interpretación y representación de los resultados de manera precisa y sistemática.

#### **7.4 Densidad de población**

La información de población se obtuvo del portal oficial de OAK RIDGE National Laboratory (<https://landscan.ornl.gov>) que proporciona datos a nivel global con una resolución de 1 km, para este estudio se utilizó la información del año 2020, en un formato GeoTIFF, estas imágenes \*.rst se procesaron en el software TerrSet, verificando el sistema de referencia y ajustándolo a la información trabajada para realizar un proceso de extracción de datos a nivel municipal para identificar a población expuesta.

Al procesar los datos, se extrajeron los datos de población para categorizar la que se localiza por cada clúster y se calculó el área de cada uno en kilómetros cuadrados. Para su cálculo, se utiliza el número total de industrias localizadas en la zona de estudio entre su extensión territorial.

#### **7.5 Imágenes PM<sub>2.5</sub>**

La información de materia particulada 2.5 (PM<sub>2.5</sub> µg/m<sup>3</sup>) se descargó del sitio oficial de la Universidad de Washington (<https://sites.wustl.edu/acag/>) del grupo de análisis de composición atmosférica (ACAG por sus siglas en inglés), esta información se encuentra a nivel mundial.

Las imágenes de PM<sub>2.5</sub> se obtienen a partir de la información satelital de MODIS, MISR y SeaWiFS, que miden la profundidad óptica de aerosoles (AOD). Estos datos se combinan con el modelo GEOS-Chem para simular el transporte atmosférico y luego se calibran con mediciones terrestres mediante una regresión ponderada geográficamente (GWR). Este proceso permite generar imágenes de 1km de resolución.

Las imágenes se encuentran en un formato \*.nc, por lo que fue necesario realizar un ajuste de georreferenciación para la zona de estudio. Posteriormente se calculó un promedio de materia particulada del periodo de los 25 años.

El procesamiento facilitó el análisis detallado de la distribución geoespacial de la materia particulada con respecto a la ubicación de las industrias, permitiendo una representación y comprensión de la información a nivel espacial.

Como parte de la misma etapa, se realizó una serie de tiempo a través de las imágenes de PM<sub>2.5</sub>, el desarrollo se llevó a cabo en el modulo *Earth Trends Modeler (ETM)* de TERSSET con una serie de tiempo mensual de 1998-2020.

Para la visualización se utilizó el cubo espacio-temporal (Figura 9), permitiendo generar una representación para identificar el comportamiento detallado de la variable en su longitud y latitud, contribuyendo al análisis exploratorio de los datos.

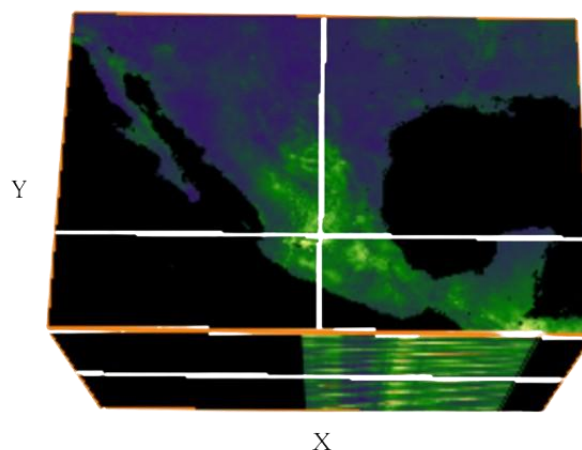


Figura 9. Earth Trends Modeler

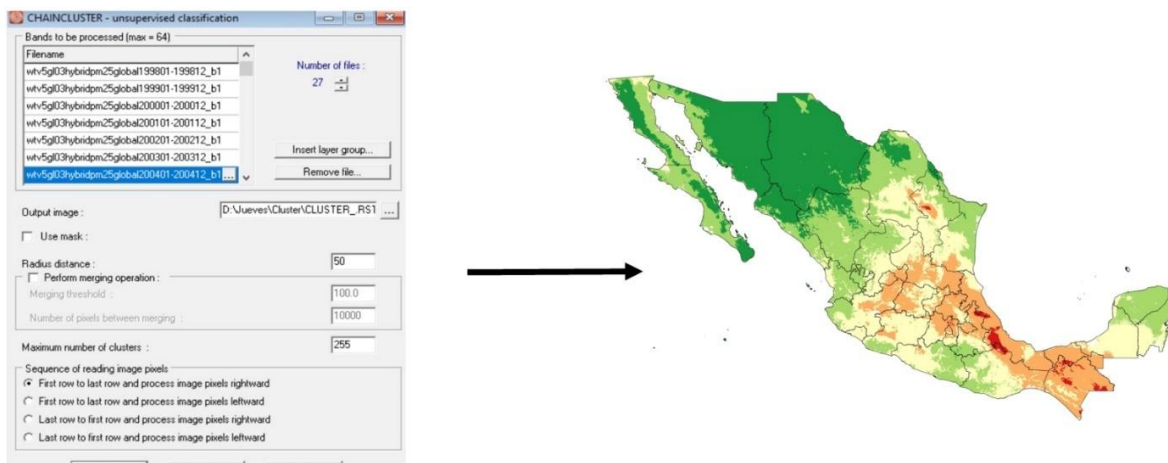
## 7.6 Proceso de regionalización

Para la obtención del clúster se analizaron los datos específicos de cada año correspondientes a las imágenes de PM<sub>2.5</sub>. Esto facilitó la identificación de zonas o regiones con características particulares de contaminantes,

permitiendo comprender los patrones espaciales de contaminación y cómo estos evolucionan a lo largo del tiempo.

En este análisis, se procesaron las imágenes de PM<sub>2.5</sub>. Es importante mencionar que para analizar los datos fue importante la similitud de las imágenes a lo largo del tiempo, así como definir el número de clústers, es decir, la forma en que se agrupan los datos. Por ejemplo, el análisis se dividió en cinco categorías que representan las zonas con menor contaminación hasta aquellas con una alta concentración de materia particulada |<sub>2.5</sub>.

La imagen muestra un proceso de clasificación no supervisada mediante el módulo Chaincluster. En figura 10, se observa el procesamiento en la que se cargaron múltiples archivos ráster para el análisis de PM<sub>2.5</sub>. Esta etapa es importante, ya que implica la selección de datos espaciales que representan las concentraciones de contaminantes en distintos periodos y zonas de estudio. Además, se definió el número de clústers utilizados para el análisis, lo que indica que se realizaron diversas pruebas y ajustes antes de obtener la clasificación final.



*Figura 10. Regionalización por clúster*

Por otro lado, se exploró la posibilidad de segmentar los datos en más de cinco clústers, considerando opciones con seis, ocho e incluso diez agrupaciones. Si bien esto permitió una caracterización más detallada de la contaminación del aire, también introdujo problemas de segmentación. Al aumentar el

número de clústers, algunas categorías reflejaban diferencias mínimas en las concentraciones de PM<sub>2.5</sub>, lo que no aportaba un cambio significativo de la variable.

Por lo anterior, se determinó emplear cinco clústers, teniendo una segmentación por ese número de cortes para distinguir de manera efectiva entre zonas con niveles bajos, moderados, altos, muy altos y extremos de contaminación por PM<sub>2.5</sub>. Esta diferenciación resultó útil, para identificar patrones de contaminación, lo que facilitó la correlación entre la exposición a PM<sub>2.5</sub> y sus efectos en diferentes poblaciones.

El análisis también consideró factores geográficos y que influyen en la concentración de PM<sub>2.5</sub>. Se identificó que regiones con alta actividad industrial presentaban consistentemente niveles elevados de contaminación, mientras que las áreas rurales y costeras tendían a mostrar valores más bajos.

Para extraer los valores de materia particulada durante el período analizado en la herramienta *Extract*, primero se ingresó una imagen de clasificación o clúster que contenía las 5 categorías analizadas, reuniéndolas conjuntamente las imágenes en un grupo Raster correspondientes a cada año en un formato compatible de *Raster group file (\*.rgf)*.

## **8. Resultados**

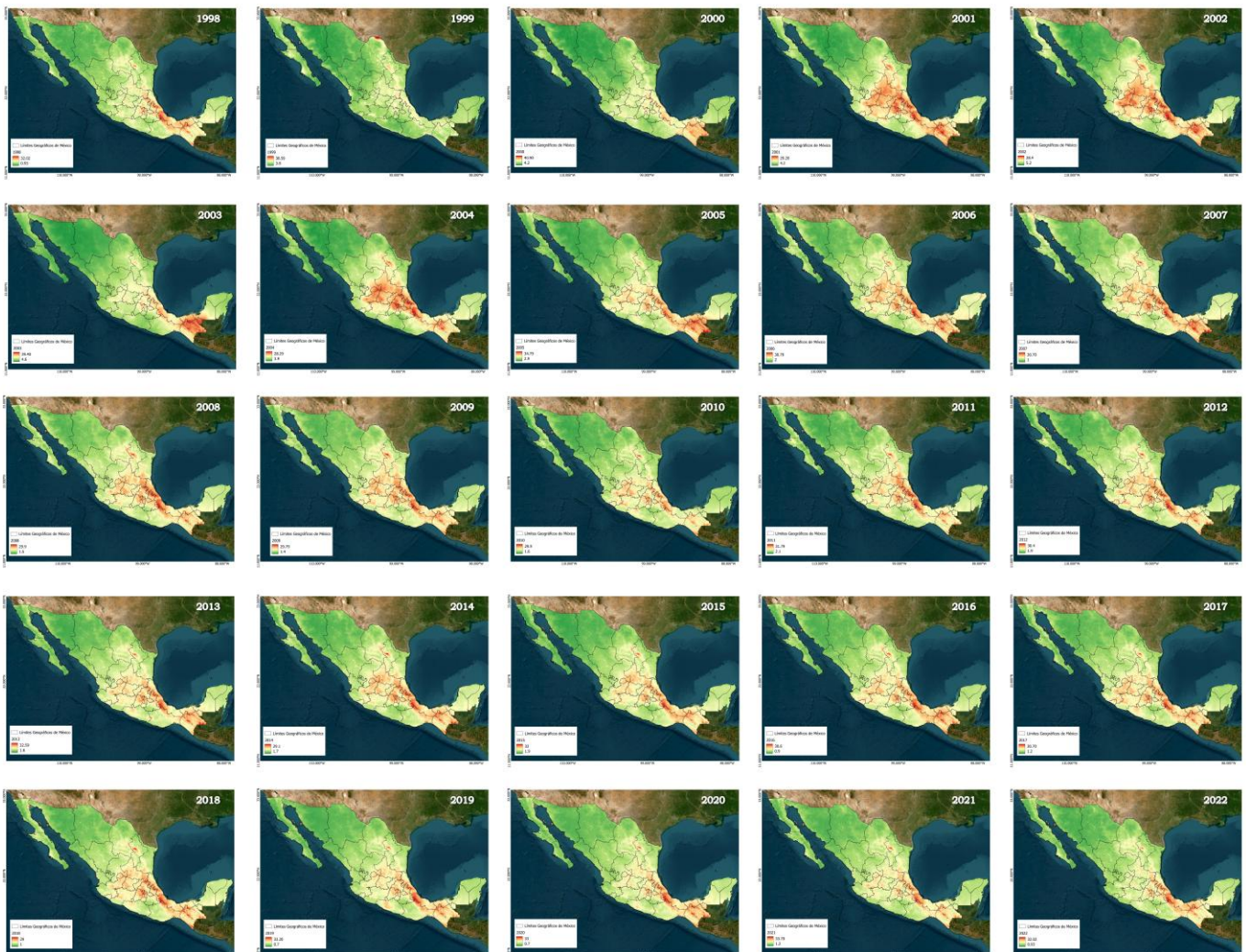
En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la contaminación industrial en las regiones de emergencia sanitaria y ambiental identificadas y en otras zonas del territorio mexicano, destacando las principales fuentes que pueden contribuir a gran parte de la contaminación, Como resultado, se identificaron regiones que por sus condiciones ambientales pueden ocasionar diversos impactos a la población por la cercanía a las industrias por sus emisiones de materia particulada  $PM_{2.5}$ .

### **8.1 Análisis espaciotemporal de $PM_{2.5}$**

El análisis espaciotemporal permitió identificar cómo la contaminación ha evolucionado en distintas zonas del país, revelando patrones de concentración que podrían reflejar impactos ambientales.

Durante el periodo de 1998 -2022, las concentraciones de  $PM_{2.5}$  han mostrado una marcada variabilidad, resultado de los cambios en las dinámicas industriales, urbanas y ambientales que han caracterizado a las últimas décadas. Estos contrastes no solo evidencian la transformación del territorio, sino también las consecuencias de un desarrollo acelerado que ha modificado de forma significativa la calidad del aire en distintas regiones.

Los valores promedio estimados de concentración de material particulado fino ( $PM_{2.5}$ ) en México muestran variaciones significativas en la intensidad de la contaminación (Figura 11).



*Figura 11. Serie de tiempo de  $PM_{2.5}$  1998 a 2022*

Durante los primeros años del periodo (1998–2003), las concentraciones promedio nacionales se mantuvieron dentro del rango de 10 a 18  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , con máximos localizados en el centro del país que alcanzaron valores cercanos a 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , especialmente en el Valle de México y zonas industriales de los estados de México, Hidalgo, Querétaro y Puebla.

En esta etapa inicial, el patrón espacial comenzó a consolidarse en torno al altiplano central, donde las condiciones topográficas y climáticas favorecen la acumulación del contaminante.

Entre 2004 y 2010 se registró una expansión de las zonas con valores altos, con incrementos en el centro-occidente hasta rangos de 20 a 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , alcanzando valores cercanos a 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en áreas metropolitanas como Ciudad de México, Guadalajara, León y Celaya. Este periodo coincide con una intensificación de la mancha de contaminación, la cual se extiende hacia el Bajío y el occidente, abarcando estados como Jalisco, Guanajuato, Querétaro, Aguascalientes y Michoacán, mientras que, en el oriente se observan incrementos moderados en regiones de Tlaxcala, Puebla y Veracruz.

Durante el periodo intermedio de 2011 a 2015, las concentraciones se mantuvieron elevadas. En los mapas de estos años, la zona central se consolidaba como el principal foco de contaminación, con valores promedio entre 22 y 28  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , y máximos que en algunos años superaban los 30  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

El Valle de México figuraba como el área más afectada, desde donde la contaminación se extendía hacia el Bajío, el altiplano potosino y sectores de la Sierra Madre Oriental, conformando un corredor continuo de altas concentraciones. En contraste, regiones como la Península de Yucatán, Baja California Sur, Sonora y Chihuahua mantenían concentraciones bajas, generalmente inferiores a 7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , evidenciando una estabilidad ambiental que contrastaba con la dinámica de deterioro registrada en el centro.

En años recientes (2016–2022), el comportamiento general mostró una ligera disminución en los valores máximos, junto con una reducción en la extensión de las zonas con mayores concentraciones. Los promedios nacionales descendieron a rangos de 12 a 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que las áreas más afectadas, como el Valle de México, Guadalajara y León, continuaron registrando valores superiores a 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en varios años.

Aunque se observó una leve mejora, la distribución espacial de la contaminación mantuvo una configuración similar a la de los periodos anteriores: la región central del país, alineada con el Eje Neovolcánico Transversal, concentró las cifras más elevadas, mientras que el sureste y las regiones costeras del Pacífico y del Golfo de México conservaron niveles bajos, entre 5 y 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . La Península de Yucatán, particularmente los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo, presentó la menor variabilidad,

manteniéndose de forma constante por debajo de los  $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  durante todo el periodo analizado.

En síntesis, la evolución temporal de la contaminación por  $\text{PM}_{2.5}$  en México entre 1998 y 2022 mostró un patrón persistente de concentración en la zona centro–occidente del país, con valores que superaron ampliamente los niveles recomendados por las guías internacionales, sobre todo en las cuencas urbanas y valles interiores.

A pesar de la leve mejora observada hacia los últimos años, las concentraciones registradas en entidades como Ciudad de México, Estado de México, Jalisco, Guanajuato, Querétaro y Puebla representan un riesgo para la calidad del aire y la salud pública. En contraste, regiones del sureste, la Península de Yucatán y gran parte del noroeste, especialmente las zonas áridas y semidesérticas del norte profundo (como amplias áreas de Sonora y Chihuahua), así como Baja California Sur, muestran muy poca variación a lo largo de las décadas. Estas regiones se mantienen con concentraciones bajas en casi todos los años observados.

La costa del Pacífico sur y sureste también tienden a mantener niveles relativamente estables y bajos en comparación con el eje central. Estas zonas se contrastan fuertemente con la franja central y con las áreas metropolitanas del centro-occidente, que son las más variables y las que registran una mayor incidencia de episodios con altas concentraciones.

En el comportamiento de los centros urbanos más identificables, el Valle de México destaca como el caso de mayor preocupación. En prácticamente todos los mapas aparece como la zona más afectada, tanto en extensión como en intensidad. Su comportamiento a lo largo de los años muestra una alta persistencia, ya que, siempre figura entre las áreas de mayor concentración, aunque la severidad puntual varíe de un año a otro.

Otros conglomerados urbanos del Occidente y Centro, como el corredor industrial del Bajío y el área metropolitana de Guadalajara, actúan como subcentros recurrentes. En ciertos años se expanden y en otros se retraen,

contribuyendo así a formar la mancha central alargada que, en varias etapas de la serie, atraviesa el país de poniente a oriente.

## **8.2 Concentración de industrias en México y su impacto en PM<sub>2.5</sub>**

La distribución de las industrias seleccionadas es heterogénea y depende de diversos factores, como la disponibilidad de recursos naturales, la infraestructura y la proximidad a los mercados. Estas industrias son fundamentales para el desarrollo económico, pero también son responsables de una gran carga de emisiones contaminantes, incluyendo partículas PM<sub>2.5</sub> (Bárcena et al., 2019; Instituto Geográfico Nacional, 2017; Montero & García, 2017).

En la República Mexicana las plantas de energía son una de las fuentes principales de contaminación, ya que tienen un papel importante para que suministre energía a todo el país, funcionando a partir de los combustibles fósiles carbón, combustóleo y gas natural (Molina, 2010; SEGOB, 2013; SEMARNAT, 2021).

Actualmente, en el país operan 21 plantas termoeléctricas, ubicadas estratégicamente en zonas con alta demanda de energía o cercanas a las principales fuentes de combustible (Figura 12). Por ejemplo, las plantas en los estados de Hidalgo, Tamaulipas, Veracruz y Coahuila abastecen tanto la demanda energética como el acceso a combustibles necesarios para su

operación.



Figura 12. Ubicación de termoeléctricas en México

En la Tabla 4, se presenta el inventario de establecimientos termoeléctricos, incluyendo su nombre y ubicación. En México existen tanto complejos del sector público, operados principalmente por la CFE, empresa responsable de la mayoría de las termoeléctricas a nivel nacional, como del sector privado, destacando IBERDROLA.

Tabla 4. Centrales termoeléctricas en México

| Nombre establecimiento                       | Estado          | Municipio   |
|--|-----------------|-------------|
| Iberdrola energía Monterrey                  | Nuevo León      | Monterrey   |
| Termoeléctrica Peñoles                       | San Luis Potosí | Tamuín      |
| Cc dos bocas CFE generación                  | Veracruz        | Medellín    |
| Generadora Poncerdel                         | Chihuahua       | Cuauhtémoc  |
| Fuerza Energía Norte Durango                 | Durango         | Durango     |
| Central Termoeléctrica Topolobampo CFE       | Sinaloa         | Topolobampo |
| Central Termoeléctrica                       | Campeche        | Lerma       |
| Central Termoeléctrica Gral. Francisco Villa | Chihuahua       | Delicias    |
| Central Termoeléctrica José Aceves Pozos     | Sinaloa         | Mazatlán    |
| Central Termoeléctrica Manzanillo            | Colima          | Manzanillo  |
| Central Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos  | Hidalgo         | Tula        |

| <b>Nombre establecimiento</b>                                     | <b>Estado</b>       | <b>Municipio</b>   |
|---|---------------------|--------------------|
| <b>Central Termoeléctrica Pdte. Adolfo López Mateos</b>           | Veracruz            | Tuxpan             |
| <b>Central Termoeléctrica Villa de Reyes</b>                      | San Luis Potosí     | Villa de Reyes     |
| <b>Central Salamanca</b>  | Guanajuato          | Salamanca          |
| <b>Central Puerto Libertad</b>                                    | Sonora              | Piquito            |
| <b>Central Termoeléctrica Guadalupe Victoria (C. T. C. Lerdo)</b> | Durango             | Lerdo              |
| <b>Central Termoeléctrica Samalayuca</b>                          | Chihuahua           | Ciudad Juárez      |
| <b>Central Termoeléctrica Altamira</b>                            | Tamaulipas          | Altamira           |
| <b>Central Termoeléctrica presidente Juárez (Rosarito, BC)</b>    | Baja California     | Playas de Rosarito |
| <b>Central Termoeléctrica Punta Prieta II</b>                     | Baja California Sur | La Paz             |
| <b>Central Termoeléctrica Mérida II</b>                           | Yucatán             | Mérida             |

La figura 13, representa la constante evolución de las emisiones de partículas  $PM_{2.5}$  de 1998 a 2022 de las plantas termoeléctricas, aunque en algunas se aprecia una tendencia de disminución de emisiones, se evidencia que algunas plantas superan los límites permisibles de materia particulada 2.5, de acuerdo con lo establecido en las directrices de la OMS ( $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) y la Norma Oficial Mexicana ( $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

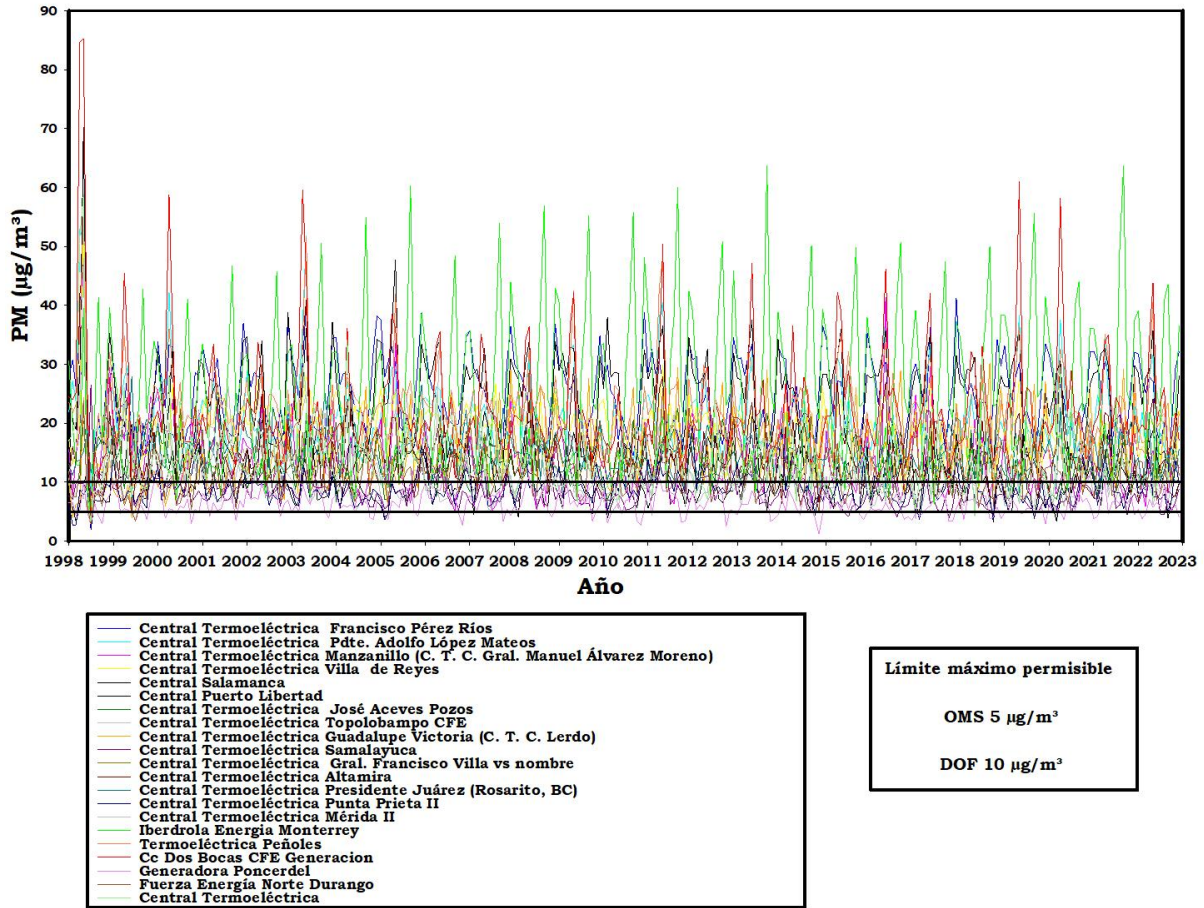


Figura 13. Gráfica de concentración de  $Pm_{2.5}$  en termoeléctricas

Con base en la figura 13, se hizo un análisis en las que se categorizaron las 3 termoeléctricas más contaminantes y que superan los límites permisibles de las OMS y de la Norma Oficial Mexicana, dando como resultado:

- **Central Termoeléctrica Topolobampo CFE:** Destaca por niveles altos y picos frecuentes que exceden los límites.
- **Central Termoeléctrica presidente Juárez (Rosarito, BC):** Tiene líneas notablemente altas durante gran parte del periodo.
- **Central Termoeléctrica Salamanca:** Presenta valores elevados y constantes.

### **Cementeras**

La Figura 14, muestra el mapa de distribución geográfica de las industrias cementeras en México. Estas industrias se localizan en áreas donde convergen factores económicos, accesos estratégicos y la disponibilidad de

recursos naturales, lo cual representa problemáticas graves para el entorno ambiental, social y poblacional (Hernández González, 2017; Quiroga Martínez, 2007).



*Figura 14. Ubicación de cementeras en México*

La industria cementera, se encuentra dispersa a lo largo de la República Mexicana, con altas concentraciones de materia particulada<sub>2.5</sub> en la zona centro del país (Estado de México e Hidalgo) que son regiones con suministros de materiales especialmente utilizados para la producción de cemento, como la arcilla y caliza. Además, la industria cementera se encuentra en puntos estratégicos en cuestión de su ubicación y de acceso (vías de comunicación, carreteras) lo que facilita su distribución en el país.

Por ejemplo, en regiones del sur (Quintana Roo y Yucatán) y el norte (Baja California Sur y Baja California) se concentra una menor densidad de plantas cementeras.

En el Salto Jalisco hay una sola planta cementera, que se encarga de distribuir el producto en el área metropolitana de Jalisco que es una de las más influyentes en el país.

En la RESA del Valle del Mezquital, hay 5 plantas cementeras, en Hidalgo se encuentran instaladas 4 de ellas y el Estado de México 1 (Tabla 5).

*Tabla 5. Cementeras ubicadas en el Valle del Mezquital, Hidalgo*

| <b>Nombre establecimiento</b>         | <b>Estado</b>    | <b>Municipio</b>      |
|---------------------------------------|------------------|-----------------------|
| <b>CEMEX cerro del cuatro</b>         | Jalisco          | San Pedro Tlaquepaque |
| <b>CEMEX planta Atotonilco</b>        | Hidalgo          | Vito                  |
| <b>Cementos Fortaleza planta Tula</b> | Hidalgo          | Atotonilco de Tula    |
| <b>Holcim planta Apaxco</b>           | Estado de México | Apaxco de Ocampo      |
| <b>Cruz Azul planta cementera</b>     | Hidalgo          | San Miguel            |
| <b>Cementos Fortaleza planta Vito</b> | Hidalgo          | Atotonilco de Tula    |

Es importante mencionar que, se obtuvieron las emisiones de contaminantes de PM<sub>2.5</sub> en el lapso de 1998-2022 para las plantas cementeras (Figura 15).

La figura 5 se representó el desarrollo de las concentraciones mensuales de partículas PM<sub>2.5</sub> (µg/m<sup>3</sup>) emanadas por las 36 cementeras existentes en México, el eje X representa los años y el Y los niveles de concentración.

El análisis de las concentraciones de PM<sub>2.5</sub> en las principales cementeras de México (1998–2022) muestra que la CEMEX planta Macuspana presenta los niveles más altos de emisión, con picos superiores a 223 µg/m<sup>3</sup>, por encima del resto de las plantas analizadas.

La ubicación de la planta en una zona cálida y húmeda como Macuspana, Tabasco, puede favorecer la acumulación local de partículas finas, intensificando los efectos sobre la calidad del aire.

Si bien para 2006 se observó una baja concentración en comparación con los anteriores años estando por debajo de 100 µg/m<sup>3</sup> en 2011-2020 se tiene un incremento en las concentraciones, mientras que a mitad de 2020 se tiene una tendencia de disminución.

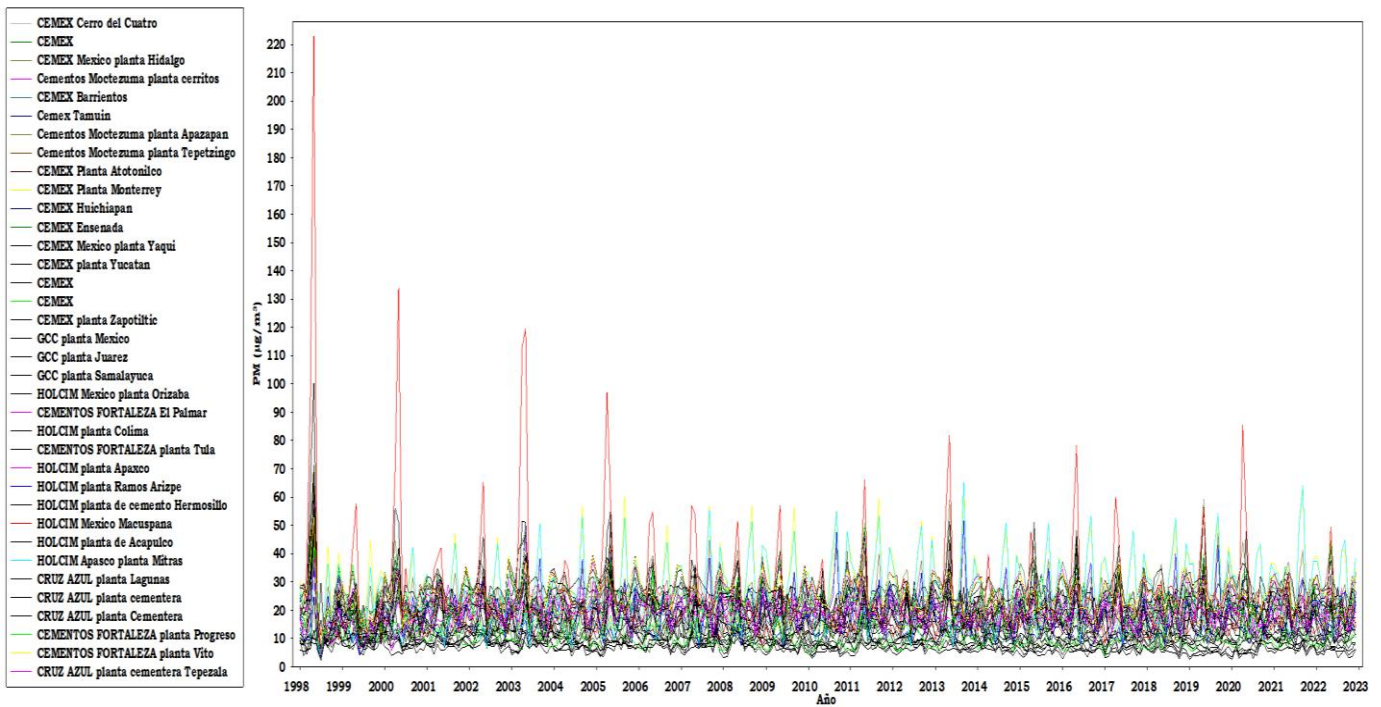


Figura 15. Gráfica de concentración de Pm<sub>2.5</sub> en cementeras

### Refinería

La figura 16 representa la concentración de las refinerías se localizan en zonas que cuentan con acceso a materias primas como el petróleo, extraído en las zona de las costas del Golfo.



Figura 16.- Ubicación de refinerías en México

Esto se relaciona con las zonas donde se lleva a cabo la refinación, así como con las zonas hidrográficas cercanas al Golfo de México, lo cual permite aprovechar los recursos hídricos necesarios para los procesos de refinación. Otro aspecto clave en la ubicación de las refinerías es su proximidad a zonas industriales, ya que se instalan para atender la demanda energética de estas regiones.

De este modo, se busca satisfacer tanto necesidades locales como nacionales, impulsando el desarrollo económico y la generación de empleo.

La figura 17, representa las concentraciones partículas micra 2.5 emitidas en las 6 refinerías (Tabla 6) que se localizan en México desde 1998 hasta 2022, estas superan los límites permisibles tanto de la Norma oficial mexicana (NOM-025-SSA1-2021) y los de la Organización Mundial de la Salud.

Tabla 6. Refinerías en México

| Nombre establecimiento    | Estado     | Municipio   |
|---------------------------|------------|-------------|
| Ing. Héctor R. Lara Sosa  | Monterrey  | Cadereyta   |
| Francisco I. Madero       | Tamaulipas | Cd. Madero  |
| Miguel Hidalgo            | Hidalgo    | Tula        |
| Ing. Antonio M. Amor      | Guanajuato | Salamanca   |
| Lázaro Cárdenas del Río   | Veracruz   | Minatitlán  |
| Ing. Antonio Dovalí Jaime | Oaxaca     | Salina Cruz |

Fue posible identificar cuáles son las refinerías con los niveles más altos de contaminación, todas superan los límites establecidos por Organización Mundial de la Salud (OMS), de  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y los establecidos por la NOM, con un límite de  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , por lo que ninguna refinería cumple con los límites establecidos.

La refinería Lázaro Cárdenas del Río (Minatitlán, Veracruz) se posiciona como la más contaminante, con concentraciones que alcanzan hasta  $117.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mostrando una tendencia constante de altos niveles de material particulado, lo que sugiere una emisión prolongada derivada de los procesos de combustión y refinación.

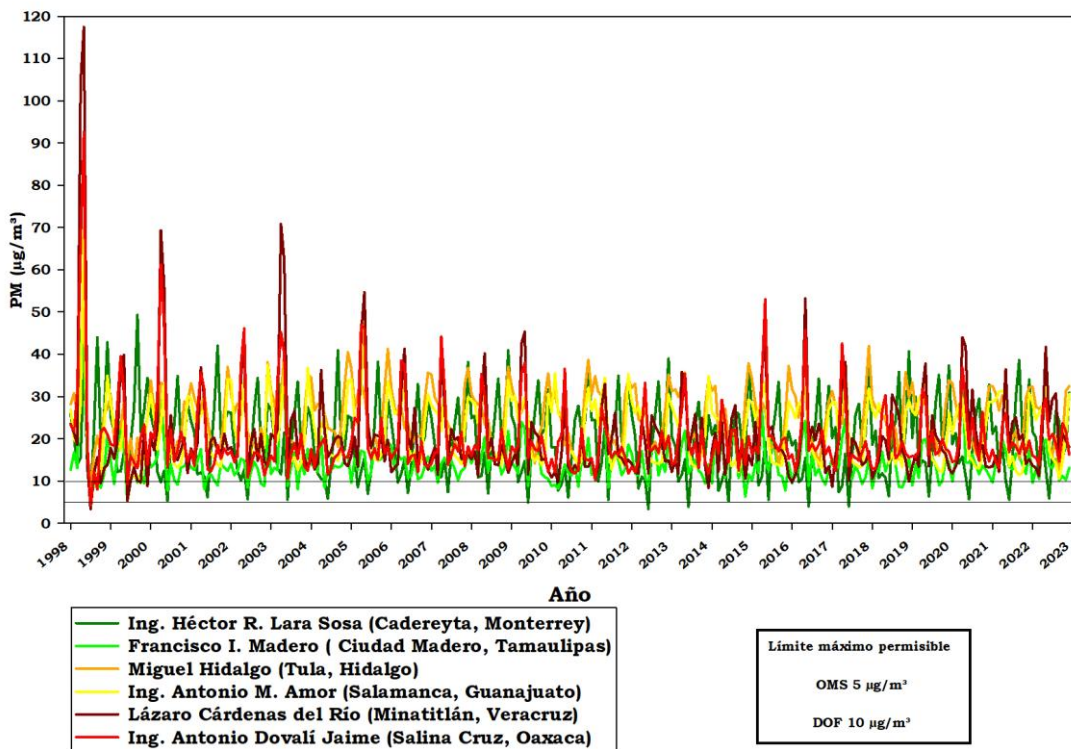


Figura 17. Gráfica de concentración de  $\text{PM}_{2.5}$  en refinerías

En segundo lugar, la Ing. Antonio Dovalí Jaime (Salina Cruz, Oaxaca) presenta valores máximos de  $92.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , lo que indica que, pese a su ubicación costera, las emisiones industriales mantienen una carga contaminante significativa.

La Refinería Ing. Antonio M. Amor (Salamanca, Guanajuato) alcanza concentraciones de hasta  $70.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , destacando por su constante liberación de contaminantes en esta región.

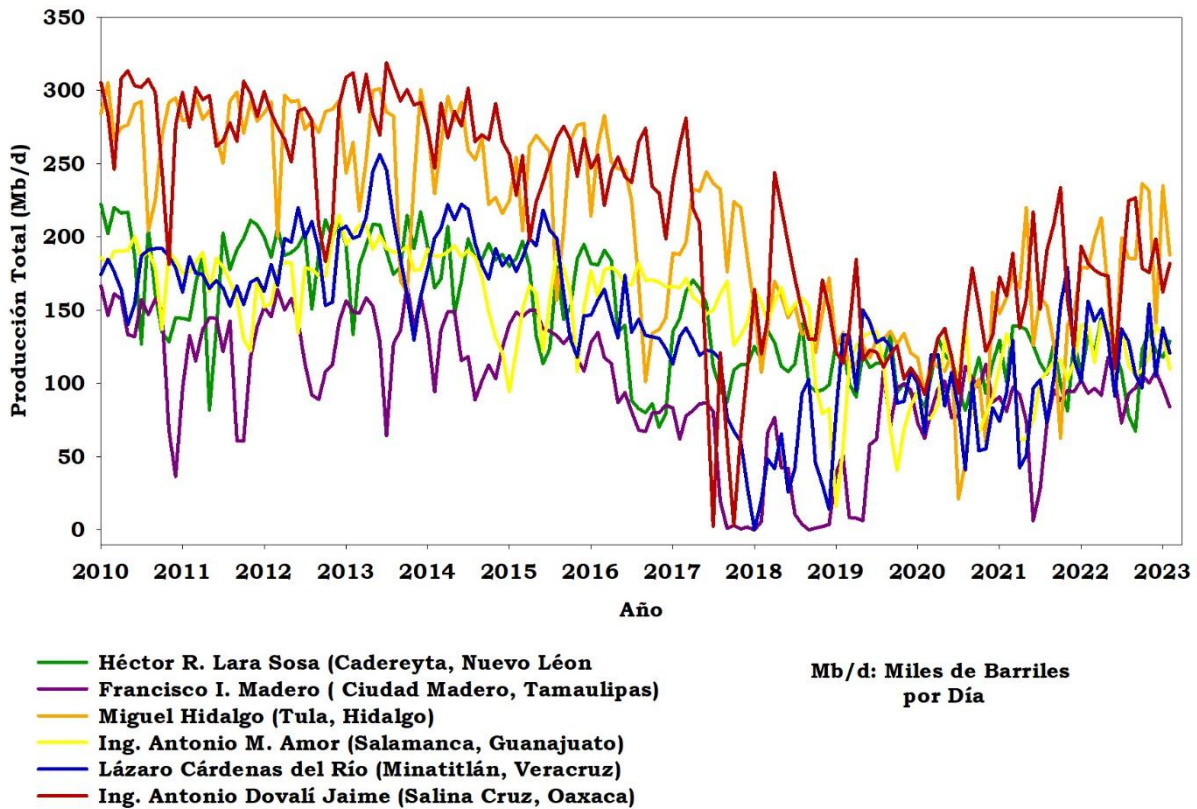
Por su parte, la Refinería Miguel Hidalgo (Tula, Hidalgo) alcanza valores de  $53.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , lo que indica una exposición continua de contaminantes atmosféricos. La Refinería Ing. Héctor R. Lara Sosa (Cadereyta, Monterrey) presenta niveles de  $49.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que la Refinería Francisco I. Madero (Ciudad Madero, Tamaulipas), aunque con la menor concentración del grupo ( $45.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), sigue rebasando los límites permisibles.

Al contrastar los datos entre las refinerías más contaminantes y aquellas con índices menores, se observa que ninguna de ellas cumple con los estándares necesarios para dejar de ser consideradas como focos de alta contaminación.

### ***Producción total de las refinerías***

La producción de barriles de petróleo procesados en esta industria por día, es un indicador que permite medir su capacidad operativa y es importante para la evaluación de su eficiencia productiva y la contribución para suministrar los combustibles y sus derivados, dividiéndose en factores como; capacidad instalada, mantenimiento, disposición de material (petróleo crudo) (Romo, 2016; Secretaría de Energía, 2012)

La figura 18 describe el comportamiento de la producción total de petróleo procesado, medido en miles de barriles por día (Mb/d), en las refinerías de México de 2010 y 2022. Cada refinería está representada por una línea de color, lo que permite identificar las variaciones en su desempeño a lo largo del tiempo.



*Figura 18. Gráfica de producción total*

A través de la representación se pudo analizar las fluctuaciones y tendencias que han generado un impacto a causa de la refinación, durante el periodo se observan patrones con altas y bajas producciones.

Para el periodo reflejo una trayectoria descendente notablemente entre 2016-2018, pero en los niveles iniciales productivos en 2010 eran con estándares superiores a 310 Mb/d en algunas refinерías, este ritmo no se ha mantenido constante.

La refinерía Ing. Antonio Dovalí Jaime (Salina Cruz, Oaxaca) consistentemente muestra la mayor producción total a lo largo de casi todo el periodo. Se observa una alta variabilidad, con picos y pronunciados, pero su línea se mantiene generalmente en la parte superior del gráfico. Siendo que en el año de 2013 alcanzó su máximo con una productibilidad de 318 Mb/d, a pesar de disminuir su producción en algunos años, especialmente alrededor de 2017-2018, se recupera y continúa siendo la de mayor producción. Su menor producción fue en el mes de julio con una fabricación de 2.5 Mb/d.

Tula se sitúa en un segundo lugar en términos de productividad total. Su producción es alta y constante estable en los primeros años (2010-2016), pero su rendimiento más alto fue en febrero de 2010 con 305 Mb/d. Aunque muestra una disminución notable a partir de 2017, similar a la tendencia general.

Lázaro Cárdenas del Río en Minatitlán, Veracruz muestra una producción intermedia, con fluctuaciones importantes. Su máximo punto productivo lo tuvo en 2013 con 256 Mb/d, también presenta caídas significativas que llegó en julio del 2020 con tan solo 21 Mb/d. En general, se mantiene en un nivel de producción inferior a Salina Cruz y Tula, pero superior a las demás.

Cadereyta exhibe una producción que fluctúa notable, con tendencias marcadas. Su producción se mantiene en un rango intermedio, generalmente por debajo de Minatitlán, Tula y Salina Cruz. Siendo en enero del 2010 su mayor productividad con 22,221 Mb/d. Se observa una disminución notable a partir de 2017, con una recuperación posterior que no alcanza los niveles previos, pero para 2022 tuvo lo más bajo con 67 Mb/d.

Salamanca muestra una fabricación frecuentemente más baja en comparación con las anteriores. Presenta fluctuaciones, pero sus picos no alcanzan los niveles de las refinerías con mayor producción. Al igual que otras, comprueba una caída importante a partir de 2017 y una compensación posterior, pese a ser limitada.

Esta refinería muestra la que la que presento el total de producción más baja de todas. Se observa una caída drástica a partir de 2017, con periodos de producción muy baja e incluso cercanos a cero. Aunque muestra cierta recuperación en los últimos años, su producción se mantiene considerablemente por debajo de las demás.

### ***Petroquímicas ubicadas en México***

Las petroquímicas son complejos industriales donde se procesa hidrocarburos por ejemplo el petróleo y gas natural para lograr obtener productos químicos y esenciales: fertilizantes, combustibles, solventes, utilizados en otras industrias.

En la figura 19, las petroquímicas están representadas por color naranja están repartidas en zona centro y sureste de México.



Figura 19. Ubicación de las petroquímicas en México

Estas ubicaciones pertenecen a puntos industriales clave, como Veracruz (la región más destacada) y que se centran 4 complejos de los 8 existentes, Jalisco, Guanajuato, Puebla y el Estado de México, que permiten atender tanto mercados nacionales como internacionales (Tabla 7).

Se destaca el reparto de la industria petroquímica en México, enfatizando tanto regiones centrales como costeras. Señala cómo las actividades industriales están asignadas en distintas regiones, vinculadas con infraestructura existente, recursos naturales y proximidad a zonas urbanas o mercados (Hernández González, 2017; Martínez Laguna, 2001). Por ejemplo, e Istmo Norte, Veracruz, siendo una zona importante para las actividades petroquímicas y energéticas en México. La figura 19 evidencia una correspondencia entre la configuración geográfica del país y las zonas de actividad industrial.

Una de las principales es el Istmo Norte, Veracruz, esta zona, situada en el Golfo de México, es esencial para la industria petroquímica mexicana oportuno a sus yacimientos de petróleo, su infraestructura portuaria. Además, es un punto clave para el Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec, que pretende fortalecer la logística y el comercio entre los océanos Atlántico y Pacífico.

Además, la región del Golfo de México es de gran importancia debido al papel central de la industria petroquímica. Las instalaciones cercanas están vinculadas a grandes complejos industriales que procesan hidrocarburos y producen derivados petroquímicos de alto valor. Gracias a su proximidad a puertos estratégicos, estas zonas facilitan tanto la exportación como el comercio dentro del país.

*Tabla 7. Petroquímicas en México*

| <b>Nombre establecimiento</b> | <b>Estado</b> | <b>Municipio</b>      |
|-------------------------------|---------------|-----------------------|
| <b>Cangrejera</b>             | Veracruz      | Coatzacoalcos         |
| <b>Cosoleacaque</b>           | Veracruz      | Minatitlán            |
| <b>Independencia</b>          | Puebla        | San Martín Texmelucan |
| <b>Escolin</b>                | Veracruz      | Poza Rica de Hidalgo  |
| <b>Tula</b>                   | Hidalgo       | Atitalaquia           |
| <b>Pajaritos</b>              | Veracruz      | Allende               |
| <b>Morelos</b>                | Veracruz      | Allende               |
| <b>Camargo</b>                | Chihuahua     | Camargo               |

En el caso de Veracruz, los cuatro complejos industriales mencionados se encuentran dentro de un entorno que facilita la integración entre la producción de hidrocarburos, la transformación de materias primas y la distribución de productos terminados hacia mercados tanto nacionales como internacionales. La cercanía con puertos como Coatzacoalcos permite reducir significativamente los costos de exportación, posicionando a esta región como una de las más importantes en el comercio petroquímico global (Gobierno de México, 2021; Martínez Laguna, 2001; Secretaría de Relaciones Exteriores, 2023).

Las plantas ubicadas en zonas interiores, como las de Jalisco, Guanajuato y Puebla, destacan por su estrecha relación con los mercados regionales. En

Jalisco, por ejemplo, la planta petroquímica de El Salto está vinculada con la industria manufacturera de Guadalajara, mientras que las de Guanajuato aprovechan su posición geográfica central para distribuir productos petroquímicos hacia distintas regiones del país.

Estas instalaciones no solo abastecen de materia prima a las industrias locales, sino que también funcionan como nodos estratégicos dentro de una red logística que conecta el norte y el sur de México

En el ámbito económico, las zonas representadas en el mapa son relevantes no solo por su capacidad productiva de bienes petroquímicos, sino también por el efecto multiplicador que generan en las economías locales. Las plantas petroquímicas impulsan sectores secundarios como la industria del plástico, los fertilizantes, los textiles y los productos químicos, lo que contribuye a la creación de empleos directos e indirectos y al fortalecimiento del desarrollo económico regional.

### ***Industria química y papel en México***

La industria química y del papel constituye un sector clave para la economía, ya que está estrechamente relacionada con la transformación de materias primas en productos esenciales para la vida cotidiana y el desarrollo industrial.

La industria química comprende la fabricación de compuestos químicos y derivados, por ejemplo, plásticos, fertilizantes, productos farmacéuticos, pinturas y detergentes, utilizando procesos que comprenden reacciones químicas y tecnologías modernas.

En cambio, la industria del papel se concentra en la elaboración de papel, cartón y productos vinculadas a partir de fibras vegetales, fundamentalmente de madera, mediante desarrollo como la pulpa, el blanqueado y el reciclaje.

El funcionamiento de ambas industrias implica riesgos ambientales y sanitarios significativos. En el caso de la industria química, el manejo inadecuado de sustancias peligrosas como ácidos y solventes puede generar contaminación y afectaciones a la salud.

Por su parte, en la industria del papel, el uso de agentes blanqueadores y compuestos químicos durante el procesamiento de la pulpa produce emisiones de polvo inflamable y otros contaminantes, además del riesgo laboral asociado al manejo de maquinaria pesada.

En México, estas industrias son importantes para el desarrollo económico. La industria química mexicana es una de las principales de América Latina, fabricando petroquímicos, plásticos, fertilizantes y otros derivados que abastecen a la República Mexicana.

La industria del papel en México ha ido en un constante crecimiento, impulsado por el apogeo del comercio electrónico, la demanda de empaques sustentables y el reciclaje.

Dichas industrias en el país están vinculadas a su ubicación, debido a los recursos naturales, la infraestructura logística y la inversión en tecnologías más limpias, lo que las posiciona como motores importantes para el desarrollo sostenible y la competitividad internacional (Hernández González, 2017).

La figura 20 muestra la distribución de la industria química y del papel dentro de México, que representan su presencia en el territorio nacional. Es claro que estas industrias están concentradas considerablemente en zonas donde convergen factores como; la proximidad a recursos naturales, logística desarrollada y acceso a mercados urbanos.



*Figura 20. Ubicación de industria química y papel en México*

La mayor concentración de industrias químicas y del papel se localiza en el centro del país, abarcando zonas del Estado de México, Ciudad de México, Puebla y Querétaro. Esta distribución evidencia la relevancia de las regiones altamente industrializadas y urbanizadas, donde existe una alta demanda de productos químicos y papel para los sectores de manufactura, construcción e impresión.

Además, esta concentración está estrechamente vinculada a la conectividad territorial, ya que estas entidades cuentan con una amplia red de carreteras, líneas ferroviarias y aeropuertos, que facilitan el transporte de materias primas y productos terminados.

Se aprecia una notable concentración de industrias de química y papel en el estado de Veracruz y áreas aledañas al Golfo de México. Esta región es geográficamente relevante debido a su proximidad a puertos decisivos que acceden a la importación de materias primas y la exportación de productos hacia mercados nacionales e internacionales.

Además, Veracruz es un punto importante para la industria petroquímica, que está estrechamente relacionada con la producción de insumos para la industria química y del papel, como plásticos, adhesivos, blanqueadores.

Para el norte del país, aunque la densidad de industrias es menor en comparación con el centro y el sureste, hay existencia relevante en los estados de Nuevo León, Chihuahua y Baja California.

Estas zonas industriales se benefician de su cercanía con Estados Unidos, el principal socio de México, por lo que, la producción de bienes químicos y papel destinados a la exportación. Monterrey, en particular, predomina como un eje industrial en el norte del país, con un planteamiento innovador y el desarrollo de productos químicos modernos.

Algunas zonas como Jalisco y Guanajuato mostraron una ocupación significativa en la industria química y del papel. Estas regiones son parte del Corredor del Bajío, una zona que ha experimentado un crecimiento económico e industrial en los últimos años. Su ubicación dentro del centro-occidente del México permitió un acceso a mercados del norte como del sur.

Es importante mencionar que la concentración de estas industrias no es aleatoria; siendo vinculada a factores geográficos y económicos. Las industrias químicas se ubican cerca de fuentes de materias primas (hidrocarburos), mientras que las de papel suelen estar próximas a zonas forestales o zonas urbanas.

### ***Concentración de la minería***

La industria minera es un sector económico antiguo y esencial en el mundo, debido que proporciona minerales y metales para diferentes actividades humanas, como la construcción y la manufactura para la tecnología y la energía eléctrica. Es necesario llevar a cabo la extracción, procesamiento y comercialización de recursos como lo son; oro, plata, cobre, hierro, carbón y litio, caliza.

En México, la industria de la construcción se encuentra vinculada a la disponibilidad y producción de materiales locales, como el cemento, el país es uno de los principales productores a nivel internacional, y agregados pétreos;

como arena y grava, usados para las estructuras básicas. Además, se resalta el uso de materiales tradicionales como el adobe y la roca en algunas zonas, donde refleja la diversidad geográfica y cultural del país.

La figura 21 muestra la distribución geográfica de la industria minera dentro de México, representando las ubicaciones exactas con presencia de actividad minera en todo el territorio nacional. Esta representación permite observar la importancia y esparcimiento de este sector industrial.



Figura 21. Ubicación de minas en México

La industria minera en México presenta una distribución heterogénea, con una marcada presencia en el norte y centro del país. Esta concentración responde a las características geológicas del territorio nacional, donde se localizan importantes yacimientos de minerales como oro, plata, cobre, zinc, hierro y roca caliza (Servicio Geológico Mexicano, 2017).

En el norte del país, especialmente en los estados de Sonora, Chihuahua y Zacatecas, se observa una alta densidad de explotaciones mineras, lo que refleja una intensa actividad en este sector. Estas entidades han tenido una

relevancia histórica en la producción de metales base, consolidándose como zonas clave dentro del desarrollo económico e industrial nacional.

En la región centro de México, se aprecia otra densidad significativa de minas, lo que pone de evidente la actividad minera en estados como Guanajuato, San Luis Potosí e Hidalgo, que han sido habitualmente zonas de extracción de minerales industriales. Estas áreas son importantes para el suministro de materiales que apoyan tanto la industria nacional como la internacional.

En contraste, el sur y sureste del país muestran una menor densidad minera, aunque la actividad no está ausente. En estas regiones, la minería se orienta principalmente a la extracción de recursos no metálicos, como mármol, caliza y otros materiales empleados en la industria de la construcción y en procesos energéticos.

### ***Fundición en México***

La industria de la fundición es un sector dedicado a la transformación de metales para la fabricación de piezas y componentes utilizados en diversas actividades productivas, como la automotriz, la construcción, la maquinaria, la energía y la manufactura.

En México, este sector constituye un componente estratégico del desarrollo industrial, debido a su estrecha vinculación con otras ramas económicas, particularmente con la industria automotriz y la de la construcción.

La figura 22 muestra la distribución geográfica de la industria de la fundición de metales en México. Este sector, estrechamente relacionado con la minería y la metalurgia, desempeña un papel central en la cadena productiva nacional, al transformar los minerales metálicos en insumos fundamentales para múltiples actividades económicas.

La ubicación geográfica de estas plantas responde a criterios estratégicos, principalmente la proximidad a yacimientos mineros, la disponibilidad de recursos energéticos y la infraestructura necesaria para los procesos de fundición y distribución.



*Figura 22. Ubicación de industria de fundición en México*

La industria de la fundición se encuentra dispersa en diversas regiones del país, lo que evidencia una amplia distribución geográfica de esta actividad y refleja la riqueza mineral del territorio mexicano.

Al analizar su localización, se observa que no se concentra en una sola zona, sino que se extiende por distintas áreas, lo cual responde a factores estratégicos, como la proximidad a los yacimientos mineros, la disponibilidad de recursos energéticos y la infraestructura logística necesaria para la distribución de los productos finales.

### **Cal y vidrio**

La industria de la cal y vidrio es un sector integral que se asocia con la producción de cal, un material inorgánico esencial, con la fabricación de vidrio, un producto versátil con múltiples aplicaciones.

La industria del vidrio es el sector que se encarga de la producción y transformación de vidrio, sólido y no cristalino que se obtiene a través de la fusión de materias primas: arena silícea, carbonato de sodio y caliza.

El vidrio producido puede tomar varias formas y propiedades, esto depende de su composición y su proceso de fabricación.

En el territorio nacional, el sector industrial de cal y vidrio muestra una distribución geográfica amplia, aunque se concentra principalmente en regiones con acceso a recursos esenciales, como piedra caliza y arena silícea, materias primas indispensables para su producción (Figura 23).



Figura 23. Ubicación de industria de cal y vidrio en México

Se observa que la mayor densidad de industrias de cal y vidrio se localizan en la zona centro y occidente del país, lo que refleja la proximidad a zonas altamente abundantes en depósitos de piedra caliza, este es un recurso nutrido en los estados como lo son; Jalisco, Guanajuato, Hidalgo y el Estado de México. Estos puntos estratégicos facilitan el acceso a las materias primas

y la reducción en los costos de transporte, siendo fundamental para la económica de estas industrias.

Un factor importante en la distribución de las industrias de cal y vidrio es la proximidad a zonas urbanas e industriales, ya que esto garantiza un mercado sólido para sus productos. Por ejemplo, la región del Bajío y el Valle de México, caracterizadas por su alta densidad poblacional y su intensa actividad económica, representan una demanda significativa de materiales utilizados en la construcción, envases de vidrio y productos derivados de estas industrias.

En otras regiones del país, como el norte y el sureste, la densidad industrial es menor, posiblemente debido a una disponibilidad limitada de materias primas, como la caliza y la arena silíceas, o a una demanda regional más reducida en comparación con las zonas centrales y más desarrolladas. No obstante, estas regiones mantienen cierta actividad industrial, principalmente orientada al abastecimiento de mercados locales.

En conjunto, cada una de las Regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental (RESA) presenta una concentración relevante de industrias, localizadas en áreas estratégicas del país donde convergen una alta densidad poblacional, infraestructura adecuada y disponibilidad de recursos naturales. Esta combinación de factores ha favorecido el asentamiento y expansión de los distintos sectores industriales analizados.

### **8.3 Ubicación de industrias en las Regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental identificadas (RESA's)**

Las ocho RESA's, son caracterizadas por una gran actividad industrial, lo que puede generar impactos negativos como en la salud pública y el medio ambiente.

La concentración de industrias en las RESA's representa un desafío importante para lograr un equilibrio entre el desarrollo económico y la calidad de vida, que frecuentemente se ve deteriorada.

Las industrias, al centrarse en determinadas regiones, tienden a incrementar la emisión de contaminantes al aire, agua y suelo, exacerbando problemas preexistentes y creando nuevos riesgos para las comunidades locales.

La figura 24, presenta la densidad industrial dentro en las ocho RESA's: El Salto (Jalisco), Cuenca Independencia (Guanajuato), Valle del Mezquital (Hidalgo), Lerma (Estado de México), Tlaxcala, Valle de Puebla (Puebla), Libres Oriental (Puebla-Veracruz), e Istmo Norte (Veracruz).

La Región de Emergencia Sanitaria y Ambiental (RESA) de El Salto se localiza en la zona centro del estado de Jalisco, dentro del corredor industrial de la Zona Metropolitana de Guadalajara. Su relieve corresponde principalmente a una planicie aluvial rodeada por sierras volcánicas del Eje Neovolcánico Transversal (SEMADET et al., 2016), con una altitud promedio de 1,500 metros sobre el nivel del mar. En términos geográficos, la RESA de El Salto se localiza aproximadamente entre los 20° y 21° de latitud norte y los 103° y 104° de longitud oeste.

La RESA del Salto, Jalisco, destaca por concentrar el mayor número de industrias, con un total de 79, lo que representa una densidad industrial de 1.9 industrias por kilómetro cuadrado, (figura 24 y Tabla 8), teniendo predominancia la industria química y papel, seguido de la industria de cal y vidrio, minas y una cementera. Desde una perspectiva geográfica.

El Salto forma parte del corredor industrial de Occidente, próximo a la Zona Metropolitana de Guadalajara, con una superficie total de 4,124.51 km<sup>2</sup>, y representa un área amplia para el asentamiento de infraestructuras industriales. No obstante, esta disponibilidad territorial no ha sido suficiente para amortiguar la carga ambiental asociada a una población total de 3,369,721 habitantes, alcanzando una densidad de 817 hab/km<sup>2</sup>, la más alta entre las ocho RESA's existentes.

Figura 24. Industrias totales en las RESA's

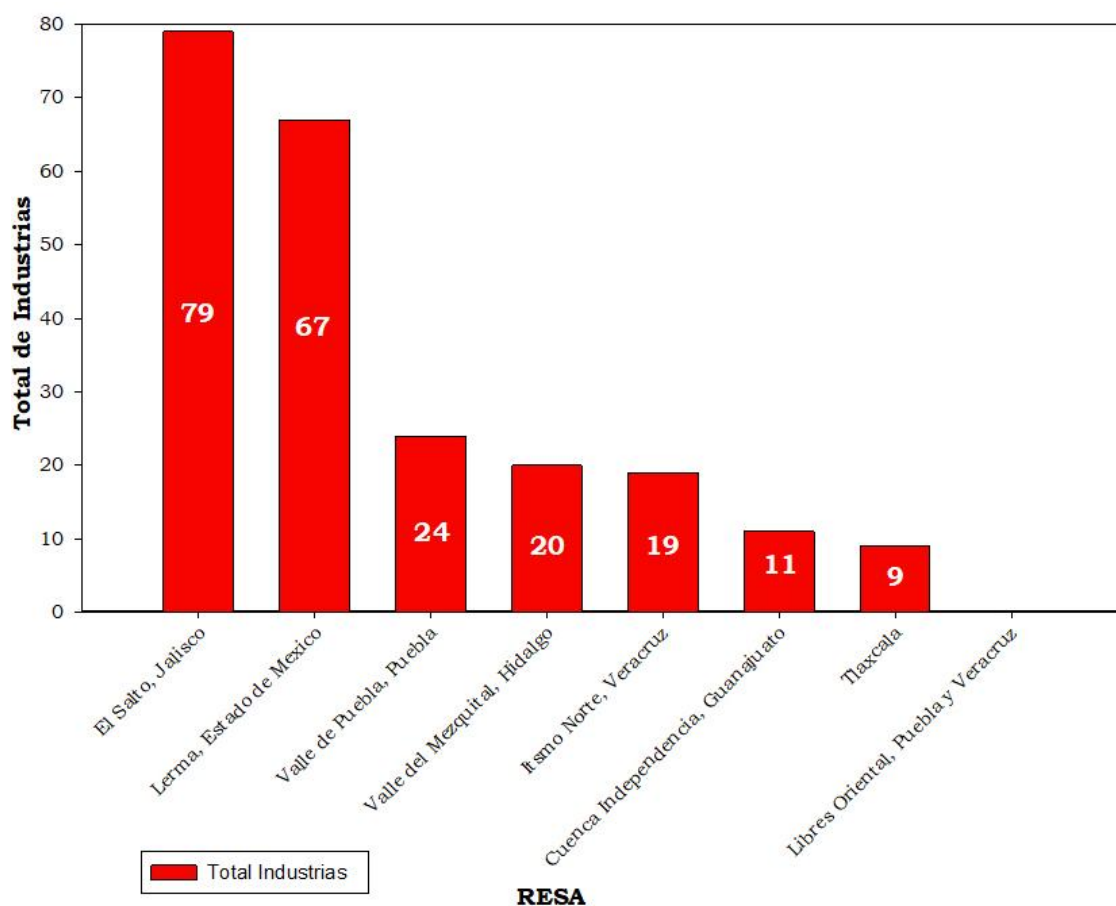


Tabla 8. Área y población en RESA's

| Nombre del Municipio                      | Población Total | Km <sup>2</sup> | Densidad de Población hab/km <sup>2</sup> | Total, de Industrias | Densidad de Industrias /km <sup>2</sup> | Concentración de partículas micras 2.5 µg/m <sup>3</sup> |
|---|-----------------|-----------------|---|----------------------|---|--|
| <b>El Salto, Jalisco</b>                  | 3,369,721       | 4124.51         | 817.00                                    | 79                   | 1.9                                     | 19.07  |
| <b>Valle de Puebla, Puebla</b>            | 1,918,696       | 1339.43         | 1432.48                                   | 25                   | 1.9                                     | 20.14  |
| <b>Valle de Mezquital, Hidalgo</b>        | 450,734         | 1184.76         | 380.44                                    | 20                   | 1.7                                     | 26.53  |
| <b>Lerma, Estado de México</b>            | 1,929,340       | 4113.29         | 469.05                                    | 67                   | 1.6                                     | 20.69  |
| <b>Guanajuato</b>                         | 1,929,340       | 10047.97        | 192.01                                    | 67                   | 0.7                                     | 19.07  |
| <b>Tlaxcala, Tlaxcala</b>                 | 658,414         | 1389.78         | 473.75                                    | 9                    | 0.6                                     | 20.96  |
| <b>Istmo Norte, Veracruz</b>              | 507,598         | 3449.48         | 147.15                                    | 18                   | 0.5                                     | 20.07  |
| <b>Libres Oriental, Puebla y Veracruz</b> | 200,891         | 3182.44         | 63.12                                     | 0                    | 0.0                                     | 20.87  |

La RESA de Lerma se localiza en la zona centro-sur del Estado de México, dentro del Valle de Toluca. Esta región se ubica dentro de una depresión estructural, enmarcada por el Eje Neovolcánico Transversal. Su extensión geográfica se encuentra entre los 19° y 20° de latitud norte, a una altitud promedio de 2,600 metros sobre el nivel del mar (INEGI, 1992).

La región de Lerma se encuentra ubicada en un entorno predominantemente industrial, que destaca por su alta concentración de actividades manufactureras, con una total de 67 industrias, lo que representa una densidad industrial de 1.6 industrias por kilómetro cuadrado. Esta cifra la posiciona como la segunda RESA con mayor número de industrias de química, papel, cal, vidrio y minas que afectan la calidad del aire.

Esta RESA tiene una superficie total de 4,113.28 km<sup>2</sup> (Tabla 8), con una población total de 1,929,340 habitantes y una densidad de 469.05 habitantes por km<sup>2</sup> lo que implica una fuerte presión antrópica sobre el territorio. La coexistencia entre zonas industriales y asentamientos urbanos, van en contacto directo, donde se ha configurado una interacción entre la sociedad y la naturaleza siendo marcada por procesos de contaminación, degradación del paisaje y la pérdida de calidad de vida (Catalán-Vázquez et al., 2018).

Esta situación se ve englobada, por la concentración promedio de partículas PM<sub>2.5</sub> de 20.69 µg/m<sup>3</sup>, superando el umbral de 5 µg/m<sup>3</sup> recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y de la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021 (10 µg/m<sup>3</sup>) como límite permisible para la salud humana. La alta densidad de población en esta región representa que un gran número de personas están expuestas de manera continua a contaminantes tóxicos, lo que incrementa el riesgo de enfermedades.

Por su parte, la Región de Emergencia Sanitaria y Ambiental del Valle del Mezquital se localizó en la región centro-oriental de México, al norte del estado de Hidalgo, entre los 19°40' y 20°30' de latitud norte. Una de las características más singulares de la región es su papel dentro de una relación con la Ciudad de México siendo principal receptor de las aguas residuales,

utilizadas para riego agrícola, convirtiendo este territorio en una zona de sacrificio ambiental (Tapia Martínez et al., 2024).

En términos industriales, el Valle del Mezquital presentó una diversidad de actividades contaminantes, solo en esta zona se localizan cinco cementeras a partir de los criterios establecidos en esta investigación, sin embargo, Ordoñez-Sierra et al., (2024) menciona la existencia de ocho cementeras en la RESA, asimismo contempla una refinería, una planta petroquímica, una termoeléctrica, una mina y doce instalaciones del sector químico y papelerero. Muchas de estas industrias son de gran escala y con procesos que involucran la quema de combustibles fósiles, liberan a la atmósfera grandes cantidades de material particulado ( $PM_{10}$  y  $PM_{2.5}$ ).

Dada la ubicación de estas instalaciones en zonas bajas del valle y la falta regulación de estas industrias, los contaminantes quedan atrapados durante largo lapsos de tiempo, generando una atmósfera tóxica con repercusiones para la población (450,734 habitantes) que se encuentra asentada en una superficie territorial de 1,184.76 km<sup>2</sup> lo cual la convierte en un espacio de alta vulnerabilidad para la población y ecosistemas.

A pesar de que su densidad industrial es menor en comparación con las dos anteriores (20 industrias), el Valle del Mezquital reportó una concentración de  $PM_{2.5}$  (26.53  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) más alta con respecto a las regiones analizadas, superando lo establecido por la OMS y la NOM-025-SSA1-2021.

En el Valle del Mezquital se encuentran complejos contaminantes del país, como la Refinería “Miguel Hidalgo” de Tula y la Central Termoeléctrica “Francisco Pérez Ríos”. Estas instalaciones emiten contaminantes atmosféricos.

Las ocho RESA's identificadas en México, localizadas en la parte centro, corresponden con los corredores industriales, en los que se ubica la industria termoeléctrica siendo la de Tula de Allende en Hidalgo, una de las más importantes, caracterizando esta zona como una de las de mayor contaminación por la calidad del aire, donde partículas y compuestos tóxicos, como óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre, la han consolidado como un

espacio industrial de alta relevancia debido a la concentración de actividades productivas, como una refinería considerada de las más importantes del país, cementeras y la industria de química y papel, entre otras dejando un foco de emisiones de gases contaminantes y residuos industriales.

### ***Termoeléctricas***

La concentración de estas instalaciones se ubica principalmente en la región centro del país (Figura 25), donde se localizan zonas de intensa actividad industrial y energética. En particular, destacan dos áreas relevantes: el Valle del Mezquital.

Una de las termoeléctricas se localiza en el Valle del Mezquital, una zona históricamente vinculada con el desarrollo industrial y energético de México. Esta planta se encuentra dentro de un corredor estratégico que abastece de energía a una amplia zona central del país, caracterizada por una elevada demanda eléctrica derivada de la concentración urbana e industrial.

La ubicación de esta termoeléctrica responde a una lógica territorial donde la proximidad a los centros de consumo, la infraestructura energética existente y la disponibilidad de recursos favorecieron su instalación. Sin embargo, esta concentración de actividades energéticas ha generado impactos ambientales significativos, entre ellos un aumento en las emisiones de gases y partículas finas que contribuyen al deterioro de la calidad del aire en la región.



*Figura 25. Distribución espacial de industria termoelectrica*

### ***Ubicación de la industria cementera en las RESA's***

Se identificaron las cementeras que se localizan en las Regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental (Figura 26). Aunque estas zonas comprenden varias regiones, unicamente en dos de ellas se cuenta con plantas cementeras: El Salto, Jalisco y el Valle del Mezquital, Hidalgo.

La RESA El Salto, Jalisco, destaca por la planta CEMEX Cerro del Cuatro, ubicada en el municipio de San Pedro Tlaquepaque. Esta instalación se encuentra cerca de la Zona Metropolitana de Guadalajara, lo que favorece la distribución de cemento en una de las áreas urbanas más grandes e industrializadas de México. Sin embargo, su operación ha generado transformaciones en aspectos socioambientales de la región.

El impacto en el paisaje es uno de los aspectos más visibles: la extracción intensiva de materias primas, como la caliza, ha alterado las áreas naturales, afectando la biodiversidad local y provocando que los terrenos ya no puedan

utilizarse para otras prácticas. Este cambio de uso de suelo genera pérdida de tierras fértiles y reduce la capacidad de las regiones para sostenerse de manera independiente y sostenible (Palacios-Sánchez et al., 2009).

El Valle del Mezquital, una región con una de las concentraciones industriales más significativas de México, alberga plantas cementeras como CEMEX Planta Atotonilco, en Vito, Hidalgo; Cementos Fortaleza Planta Tula, en Atotonilco de Tula, Hidalgo; Cruz Azul Planta Cementera, en San Miguel, Hidalgo; Cementos Fortaleza Planta Vito, también en Atotonilco de Tula; y Holcim Planta Apaxco, localizada en Apaxco de Ocampo, Estado de México. Estas plantas son consideradas por las empresas como algunas de las más importantes del sector cementero a nivel nacional.

La presencia de estas cementeras ha transformado radicalmente la región. Desde una perspectiva territorial, la expansión de estas instalaciones ha ocasionado cambios en los ecosistemas locales, perjudicando los hábitats naturales y alterando el equilibrio ecológico (González Flores, 2015). Dichas modificaciones han reducido la capacidad de regeneración de los ecosistemas naturales, lo que pone en peligro la sostenibilidad ambiental a corto y largo plazo en las regiones (WWF, 2025).

En las seis RESA's restantes Cuenca Independencia en Guanajuato, Lerma en el Estado de México, Tlaxcala, Valle de Puebla en Puebla, Libres-Oriental en Puebla y Veracruz, e Istmo Norte en Veracruz), no se registran plantas cementeras.



Figura 26. Distribución espacial industria cementera

### **Refinerías ubicadas en las RESA's**

Las refinerías son industrias de gran relevancia por su producción y su alto grado de contaminación. Dos de las que más destacan por su impacto ambiental se localizan en la RESA Valle del Mezquital, con la Refinería Miguel Hidalgo en Tula, Hidalgo, y en la RESA del Istmo Norte, con la Refinería Lázaro Cárdenas del Río en Minatitlán, Veracruz (Figura 27).

Estas instalaciones desempeñan un papel fundamental en la generación de combustibles para la zona centro del país, incluida la Zona Metropolitana de la Ciudad de México.

Los principales impactos de las refinerías se reflejan en la calidad del aire, debido a la emisión de compuestos tóxicos y material particulado. En consecuencia, el Valle del Mezquital fue considerado entre 2002 y 2005 por la UNESCO como una de las regiones más contaminadas del mundo, debido al vertido de aguas residuales industriales en ríos y cuerpos de agua

provenientes de la Ciudad y el Valle de México, lo que afectó gravemente la calidad del agua para consumo humano y riego (De la Mora De la Mora, 2012).

La Refinería Lázaro Cárdenas del Río, ubicada en la RESA del Istmo Norte, municipio de Minatitlán, Veracruz, es la más antigua y una de las más grandes del país. Su impacto en la región es profundo y multifacético, ya que abastece una proporción significativa de combustibles para el sur-sureste de México ((Pemex, 2023).

El impacto social también es notable: la presencia de la refinería ha impulsado un crecimiento urbano desordenado en Minatitlán, promoviendo la expansión de asentamientos humanos cercanos a la instalación industrial, lo que incrementa la exposición de la población a la contaminación (Jiménez Toro, 2021).

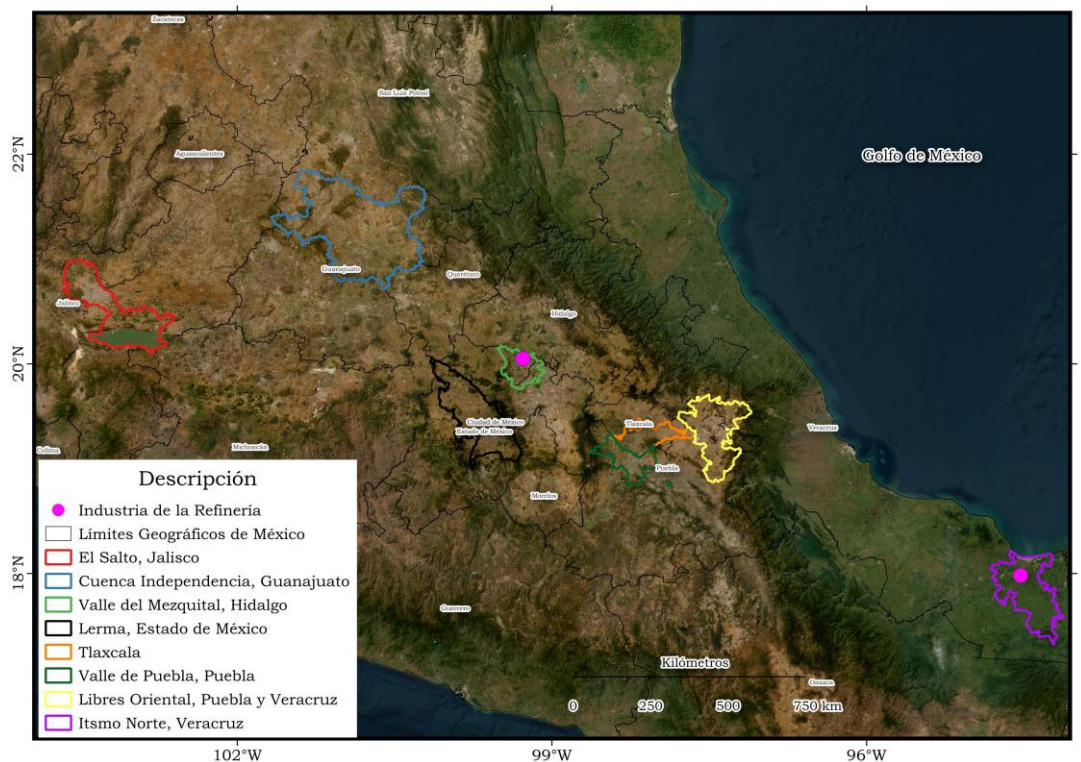


Figura 27. Distribución espacial de refinería

En las demás RESA's (El Salto, Jalisco; Cuenca Independencia en Guanajuato; Lerma en el Estado de México; Tlaxcala; Valle de Puebla, Puebla; y Libres-Oriental en Puebla y Veracruz), no se registran refinerías.

### ***Petroquímicas ubicadas en las RESA's***

En la Figura 28 se muestra la localización de las industrias petroquímicas dentro de las RESA en México. Estas regiones han sido identificadas por presentar altos niveles de degradación ambiental y riesgos sanitarios significativos (Azamar Alonso & Téllez- Ramírez, 2021).



*Figura 28. Distribución espacial de industria de petroquímica*

De las ocho RESA's, tres cuentan con plantas petroquímicas: Valle del Mezquital, Valle de Puebla e Istmo Norte; mientras que las cinco restantes no registran este tipo de actividad industrial.

La RESA del Istmo Norte, ubicada en el estado de Veracruz, concentra la mayor cantidad de complejos petroquímicos: Morelos, Pajaritos, Cangrejera y Cosoleacaque. Estas instalaciones, localizadas en los municipios de Allende, Coatzacoalcos y Minatitlán, conforman un corredor industrial de relevancia nacional debido a su alta producción de compuestos petroquímicos.

La zona se beneficia de su proximidad a los puertos marítimos y de su conexión mediante oleoductos con otras regiones industriales del país en el

noroeste, sur y occidente, consolidándose como un epicentro de la industria petroquímica en México gracias también a su cercanía con los principales yacimientos de petróleo y gas natural (Martínez-Laguna et al., 2002).

Cada uno de estos complejos cumple funciones específicas: desde la producción de compuestos químicos básicos hasta la elaboración de productos finales destinados al consumo nacional y a la exportación. Sin embargo, su operación genera una doble consecuencia: por un lado, un aporte significativo a la economía nacional; y por otro, una alteración profunda del entorno natural, afectando los ecosistemas locales y la calidad ambiental.

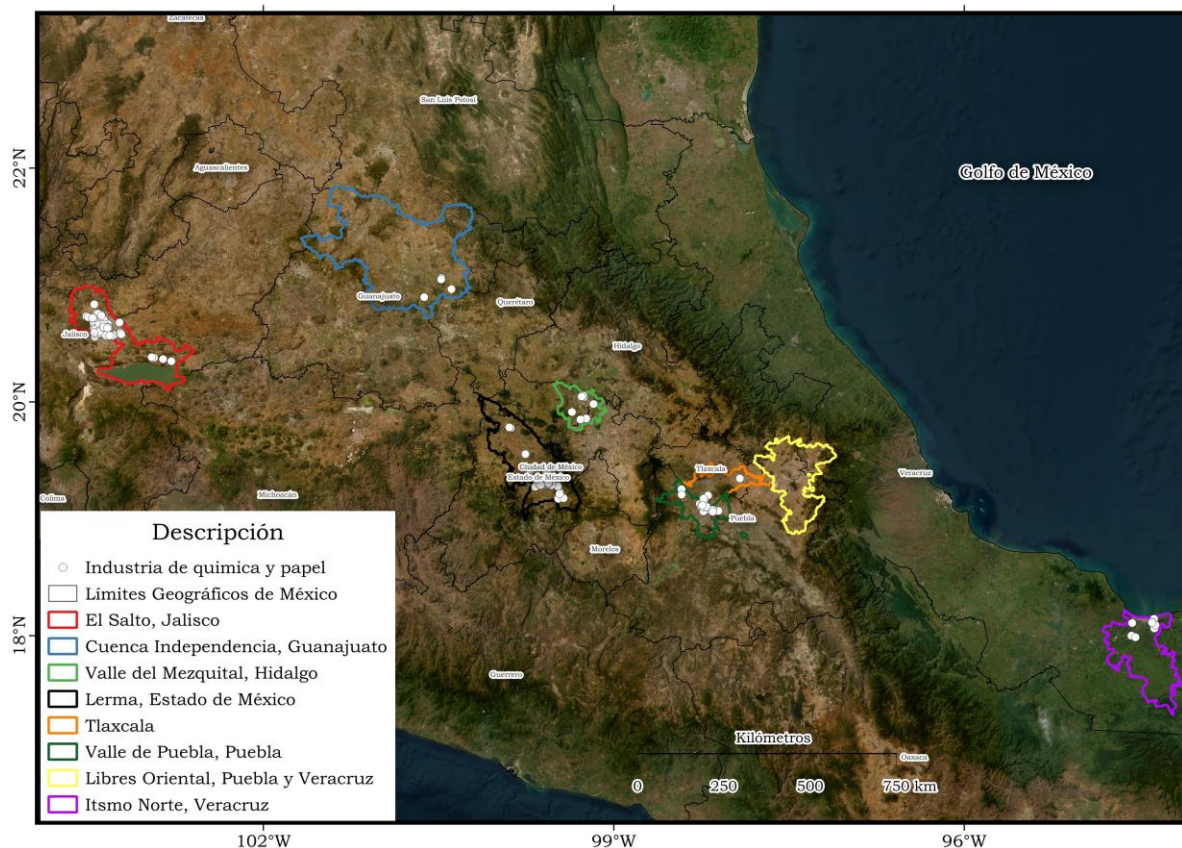
En la Resa del Istmo Norte, domina el panorama petroquímico mexicano; asimismo otras regiones también tienen importantes complejos industriales, por ejemplo, el Valle del Mezquital, con su planta en Atitalaquia, Hidalgo, y el Valle de Puebla, con el complejo de Independencia en San Martín Texmelucan.

En esta misma línea, el Valle del Mezquital alberga una planta petroquímica ubicada en Atitalaquia, Hidalgo, capaz de refinar hasta 315 mil barriles de petróleo crudo diarios. No obstante, el tamaño y las operaciones de esta instalación han provocado diversos problemas ambientales que impactan tanto al estado de Hidalgo como a zonas aledañas de la Ciudad de México.

Por su parte, el Valle de Puebla también se distingue por la presencia del complejo petroquímico Independencia, en San Martín Texmelucan. Este polo industrial ha sido uno de los más importantes del país, pero su cercanía con asentamientos humanos ha generado serios problemas ambientales y sociales, afectando la salud de la población, la calidad de vida y el equilibrio ecológico de la región.

### ***Distribución de industria química y papel***

La dispersión de la industria química y de papel en las ocho regiones de México, ofrece una visión clara de las disparidades en el desarrollo industrial del país (Figura 29). Cada región muestra características particulares que permiten entender mejor el estado actual de este sector.



*Figura 29. Distribución espacial de química y papel*

El Salto, Jalisco, destaca como un importante centro industrial, con 74 empresas dedicadas a las industrias química y papelera, lo que refleja el dinamismo del sector en la región. Esta zona cuenta con una infraestructura sólida que favorece la fabricación de productos como papel para impresión, cartón, empaques y artículos sanitarios. En cuanto a la industria química, la RESA de El Salto alberga plantas que producen desde compuestos básicos hasta materiales avanzados utilizados en sectores como la construcción, la agricultura y la farmacéutica (McCulligh Deblasi, 2017).

La Cuenca Independencia, en Guanajuato, muestra una participación mucho menor, con solo 9 industrias registradas. Esto podría explicarse por una menor especialización en este tipo de actividades industriales en comparación con otros sectores que predominan en el estado.

El Valle del Mezquital, concentra una importante actividad industrial en México, incluida la industria de química y papel. Aunque en términos absolutos tiene una menor concentración que otras regiones (con 12

empresas dedicadas a este sector), coincidiendo con otras empresas como refinerías, cementeras y una termoeléctrica.

La RESA de Lerma, ubicada en el Estado de México, es una de las regiones más importantes para la industria de química y papel en el país, al tener un total de 61 empresas dedicadas a este sector. La región de Tlaxcala, con solo 6 industrias, muestra una participación limitada en este sector. Esto puede estar relacionado con la actividad económica enfocada con otros sectores.

En el Valle de Puebla, se registran 22 industrias, una cifra intermedia que refleja una presencia significativa del sector en una región con crecimiento constante en diversas ramas industriales. Finalmente, en el Istmo Norte, Veracruz, se reportan 12 industrias químicas y papeleras; aunque su número es reducido en comparación con otras zonas, evidencia cierta diversificación en un estado dominado principalmente por la actividad petroquímica y de refinación.

### ***Industria minera en las RESA's***

En la figura 30 se presenta la distribución de minas en México, centrándose en aquellas regiones declaradas como zonas de emergencia debido a la alta densidad de trabajadores.



Figura 30. Distribución espacial de minería

La concentración de las minas se ubica en cuatro regiones específicas: el Valle del Mezquital (Hidalgo), El Salto (Jalisco), Lerma (Estado de México) e Istmo Norte (Veracruz).

La minería es una actividad de gran relevancia en México, especialmente en la región norte del país, donde destacan los estados de Durango, Coahuila, Sonora, Chihuahua y Zacatecas. La extracción de minerales como plata, oro y zinc ha impulsado el desarrollo económico de estas zonas; sin embargo, también ha provocado un deterioro constante del suelo y diversas alteraciones en el medio ambiente (Coll-Hurtado et al., 2001)

El Valle del Mezquital es una región de gran relevancia en el sector minero. La región cuenta con una diversidad de minerales, incluyendo plata, oro, cobre, plomo y zinc (Pérez Ramírez, 2010).

La actividad minera en el Valle del Mezquital ha generado un impacto ambiental considerable, generando una serie de problemas que afectan la calidad de vida de las comunidades locales y los ecosistemas, una serie de

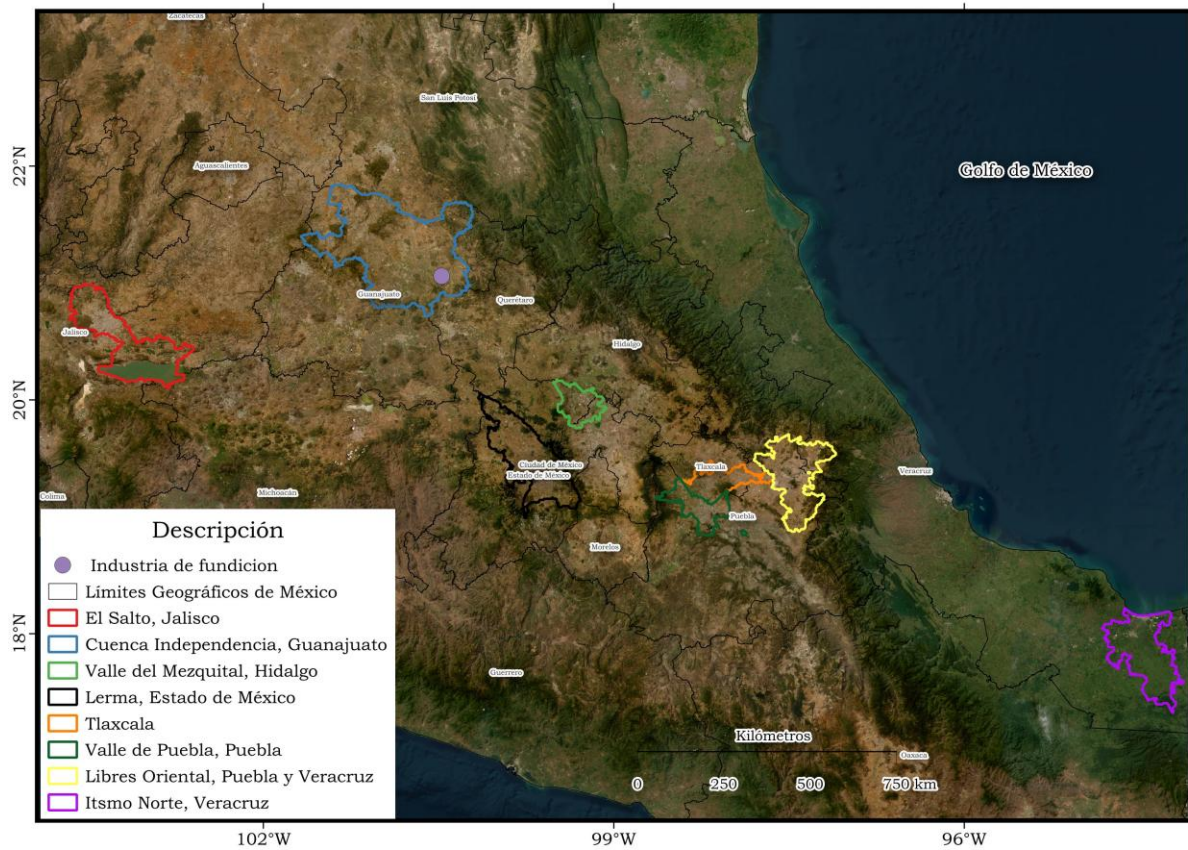
conflictos socioambientales que han intensificado la relación entre las empresas mineras, las comunidades locales y los gobiernos.

La RESA de Lerma, Estado de México, se encuentra en una situación similar. La combinación de una creciente demanda de minerales y la presión por el desarrollo económico ha impulsado la expansión de la actividad minera en la región. Sin embargo, esta expansión ha generado conflictos con las comunidades locales, quienes han expresado su preocupación por los impactos ambientales y sociales de la minería. La escasez de agua y la degradación de los suelos son problemas recurrentes en este tipo de zonas (Aguilar-Sánchez & De La Rosa-Mejía, 2018; Cotler et al., 2004).

Sin embargo, es importante mencionar que, aunque se han identificado estas cuatro minas con 51 y más trabajadores, existen otras minas que podrían estar operando en estas áreas pero que no cumplen con el criterio de personal ocupado superior a 51.

### ***Industria de fundición en las RESA's***

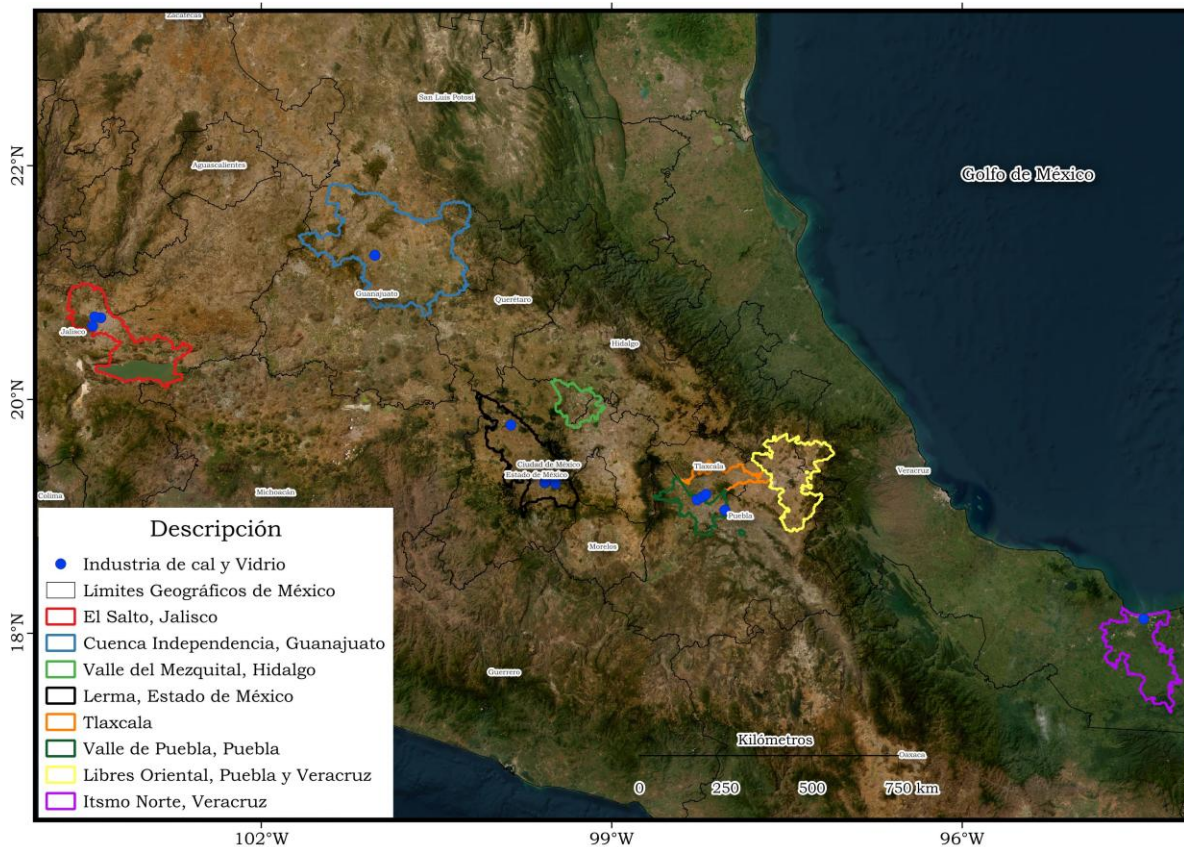
Al analizar exploratoriamente la distribución geográfica de la industria de fundición en México, con un enfoque particular en las RESA's se encontró que, únicamente la Cuenca de Independencia, Guanajuato presenta industria de fundición, las otras RESA's no cuentan con esta práctica, sin embargo, este hallazgo no significa que no existan otras empresas de fundición en el país, por lo que es probable que haya un número considerable de empresas más pequeñas operando en diversas regiones (Figura 31).



*Figura 31. Distribución espacial de fundición*

### ***Industria cal y vidrio en las Resas***

La figura 32, muestra la distribución geográfica de la industria de cal y vidrio en México, revelando una notable variabilidad en la presencia de empresas a lo largo del territorio nacional. Se evidencio una concentración de actividades industriales en ciertas regiones, mientras que otras muestran una presencia casi nula o sin ninguna de estas.



*Figura 32. Distribución espacial de Industria de cal y vidrio*

En particular, la zona El Salto, Jalisco, es clave para la industria de cal y vidrio en México. La concentración de tres empresas en esta región sugiere la existencia de condiciones propicias que favorecen su desarrollo, tales como la disponibilidad abundante de materias primas, infraestructura adecuada y acceso a una mano de obra calificada, estas condiciones convierten a El Salto en una zona industrial de relevancia por su producción ante las necesidades del país.

La región de Lerma también destaca como un área con una concentración de cinco industrias, lo que subraya su relevancia en el ámbito productivo de la industria de cal y vidrio, lo cual podría ser resultado de factores como su cercanía a mercados clave. En los estados de Puebla y Tlaxcala, la presencia industrial también es similar debido a que cuentan con dos industrias.

En Guanajuato, la Resa Cuenca de Independencia, se muestra una concentración baja en comparación con las otras con una empresa de cal y vidrio. En contraste, hay dos RESA's que no presentan este tipo de industria

(Valle del Mezquital en Hidalgo, la región de Libres Oriental en Puebla, Veracruz e Istmo Norte en Veracruz), la falta de actividad industrial en estas áreas podría ser atribuida a una combinación de otros factores.

### ***Concentración de industrias en las RESA's***

La región de El Salto, Jalisco, presenta la mayor densidad industrial (Figura 33), posiblemente influenciada por su cercanía con la Zona Metropolitana de Guadalajara, que forma parte de un importante corredor industrial. En contraste, la región de Libres-Oriental, ubicada entre Puebla y Veracruz, no cuenta con ninguna de las industrias analizadas en esta investigación. Su clasificación como RESA podría deberse a la presencia de otras actividades industriales, como las granjas Carroll, las cuales han generado inconformidad social debido a los problemas de contaminación asociados con sus operaciones (López-Fabila, 2020).

Las regiones con mayor densidad industrial son El Salto, Jalisco y Valle de Puebla, ambas con 1.9 industrias por km<sup>2</sup>. Esto significa que en estos territorios existe una alta concentración de establecimientos industriales, probablemente vinculada al desarrollo de sectores manufactureros, agroindustriales y de transformación. Además, estas zonas suelen tener una infraestructura industrial consolidada y una cercanía estratégica con grandes centros urbanos.

En segundo lugar, se ubican el Valle del Mezquital, Hidalgo, con 1.7 industrias por km<sup>2</sup>, y Lerma, Estado de México, con 1.6 industrias por km<sup>2</sup>. Ambas regiones mantienen una alta densidad de industrias, lo que refleja su papel histórico en la economía industrial mexicana y su conexión con corredores productivos importantes.

Por otro lado, las regiones con menor densidad industrial son Cuenca Independencia, Guanajuato (0.7), Tlaxcala (0.6) y Istmo Norte, Veracruz (0.5). Estas presentan una baja concentración de establecimientos industriales, lo que sugiere un menor desarrollo industrial o una distribución más dispersa de las actividades productivas. En el caso de Istmo Norte, Veracruz, la baja

densidad podría estar relacionada con un enfoque económico más orientado al sector energético o de transporte que al industrial intensivo.

En conjunto, la gráfica evidencia una desigual distribución de la actividad industrial entre las RESA's del país. Las regiones del centro y occidente (Jalisco, Puebla, Hidalgo y Estado de México) concentran las mayores densidades, mientras que las del sur y sureste (Guanajuato, Tlaxcala y Veracruz) muestran niveles mucho más bajos.

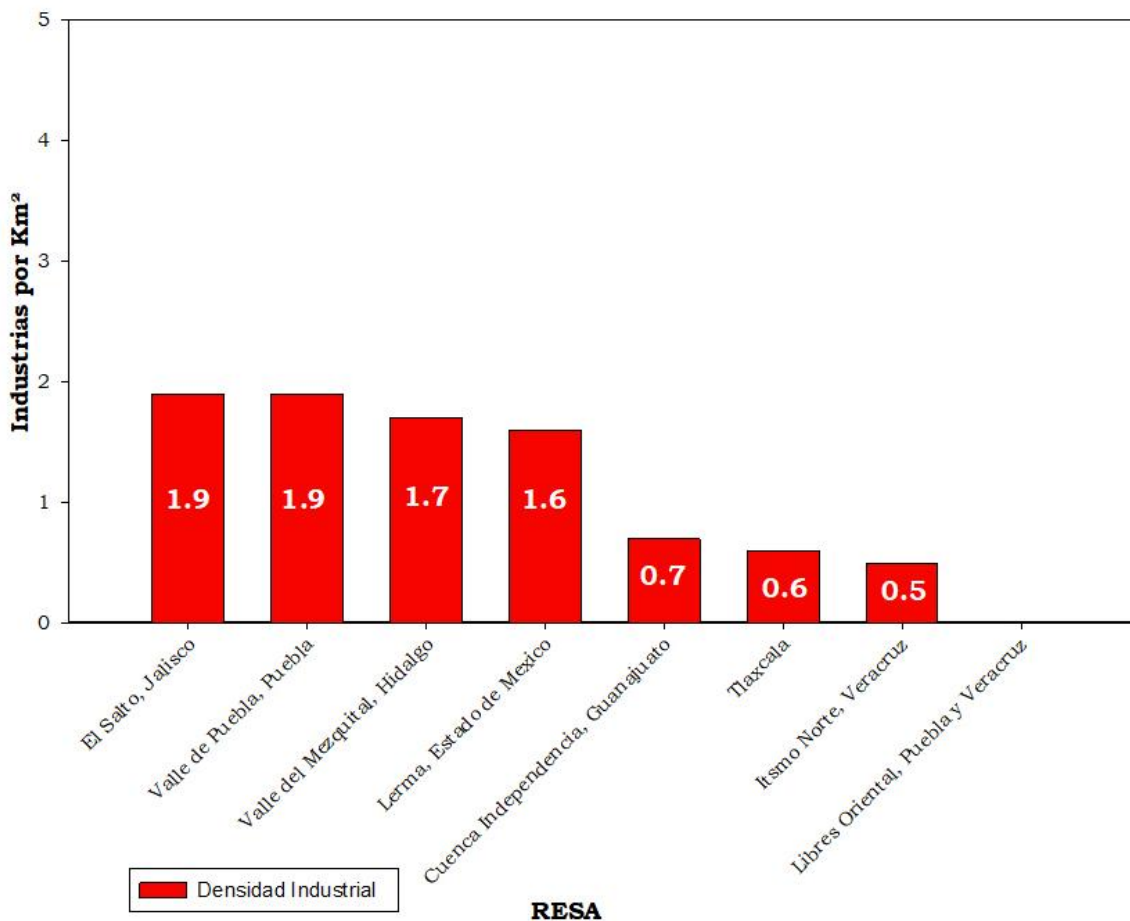


Figura 33. Densidad de industrias en las RESA's

Aunque uno de los principales criterios para definir una RESA fue la concentración de industrias, hay otros factores que permiten su clasificación, como las actividades manufactureras, extractivas, agricultura y altas concentraciones de contaminantes en el ambiente (Azamar Alonso & Téllez Ramírez, 2021), sin embargo, en la investigación en la que se definen las ocho RESA no se habla de un elemento que es importante considerar, como la densidad de población, por lo que en el presente estudio se integra este dato,

el cual, permitió analizar cuanta población se encuentra expuesta a la contaminación y en qué medida está siendo afectada por la productividad de las industrias.

En este contexto, los municipios que conforman la Región El Salto, Jalisco tienen un tamaño de población de 3,369,721 habitantes (Tabla 9).

*Tabla 9. Densidad de población en la Resa del Salto, Jalisco*

| <b>Nombre del Municipio</b>          | <b>Población Total</b> | <b>Km<sup>2</sup></b> | <b>Densidad de Población hab/km<sup>2</sup></b> | <b>Total, de Industrias</b> | <b>Densidad de Industrias /km<sup>2</sup></b> | <b>Concentración promedio de partículas micras 2.5µg/m<sup>3</sup></b> |
|--------------------------------------|------------------------|-----------------------|---|-----------------------------|---|--|
| <b>Chapala</b>                       | 48957                  | 634.05                | 77.21   | 0                           | 0   | 22.07  |
| <b>Guadalajara</b>                   | 1043892                | 155.08                | 6731.40   | 19                          | 0.1   | 22.07  |
| <b>Ixtlahuacán de los Membrillos</b> | 57302                  | 202.34                | 283.20  | 0                           | 0   | 19.07  |
| <b>Juanacatlán</b>                   | 22132                  | 137.22                | 161.29  | 0                           | 0   | 19.07  |
| <b>Ocotlán</b>                       | 108977                 | 245.69                | 443.56  | 0                           | 0   | 19.07  |
| <b>Poncitlán</b>                     | 25304                  | 834.10                | 30.34   | 4                           | 0   | 19.07  |
| <b>El Salto</b>                      | 138619                 | 85.43                 | 1622.58   | 5                           | 0.1   | 22.07  |
| <b>San Pedro Tlaquepaque</b>         | 520717                 | 117.88                | 4417.44   | 18                          | 0.2   | 22.07  |
| <b>Tonalá</b>                        | 369221                 | 168.37                | 2192.95   | 4                           | 0   | 22.07  |
| <b>Zapopan</b>                       | 1025032                | 1151.96               | 889.81  | 29                          | 0   | 19.07  |
| <b>Zapotlán del Rey</b>              | 9568                   | 408.11                | 23.44   | 0                           | 0   | 19.07  |
| <b>TOTAL</b>                         | <b>3,369,721</b>       |                       |   | <b>79</b>                   |   |  |

La dinámica social en el Salto, Jalisco se ha visto alterada, debido al crecimiento industrial, que ha conllevado a que a trabajadores de otras regiones migren a zonas con mejores oportunidades laborales, provocando el aumento en la población y generando presiones adicionales sobre el ambiente (Lezana, 2016).

La región que conforma la cuenca independencia de Guanajuato tiene una densidad poblacional de 572,793 habitantes por km<sup>2</sup> que se encuentran expuesta a la contaminación de las industrias que se instalan en el territorio (Tabla 10).

Tabla 10. Densidad de población en la Resa De la Cuenca Independencia, Guanajuato

| Nombre del Municipio  | Población Total | Km      | Densidad de Población hab/km <sup>2</sup> | Industrias Totales | Densidad de Industrias /km <sup>2</sup> | Concentración promedio de partículas micras 2.5µg/m <sup>3</sup> |
|-----------------------|-----------------|---------|---|--------------------|---|--|
| San Miguel de Allende | 132287          | 3006.63 | 44.00                                     | 2                  | 0.07                                    | 19.07  |
| Doctor Mora           | 19501           | 232.49  | 83.88                                     | 0                  | 0                                       | 19.07  |
| Dolores Hidalgo       | 145559          | 544.60  | 267.28                                    | 1                  | 0.018                                   | 19.07  |
| San Diego de la Unión | 25936           | 1547.01 | 16.77                                     | 0                  | 0                                       | 19.07  |
| San Felipe            | 88466           | 2032.56 | 43.52                                     | 0                  | 0                                       | 19.07  |
| San José de Iturbide  | 65002           | 1018.97 | 63.79                                     | 8                  | 0.079                                   | 19.07  |
| San Luis de la Paz    | 96042           | 1656.16 | 57.99                                     | 0                  | 0                                       | 19.07  |
| <b>TOTAL</b>          | <b>572,793</b>  |         |   | <b>11</b>          |   |  |

La instalación de industrias químicas, de papel, de cal y vidrio, y de fundición contribuyó significativamente a la contaminación del aire, agua y suelo en la Cuenca de la Independencia.

El establecimiento de estas industrias transformó de manera significativa la vida cotidiana de las comunidades locales, alterando sus dinámicas sociales, económicas y ambientales. El ruido constante proveniente de las plantas industriales, junto con la contaminación visual generada por el deterioro de los ecosistemas, afectó la tranquilidad y el bienestar de los habitantes.

La región del Valle del Mezquital conformada por siete municipios, con una población total de 470,734 (Tabla 11), enfrenta problemáticas, debido a la alta concentración de actividades industriales. En esta región se instalan industrias altamente contaminantes.

Tabla 11. Densidad de población en la Resa del Valle del Mezquital, Hidalgo

| Nombre del Municipio           | Total de Población | Km     | Densidad de Población hab/km <sup>2</sup> | Industrias Totales | Densidad de Industrias /km <sup>2</sup> | Concentración promedio de partículas micras 2.5µg/m <sup>3</sup> |
|--------------------------------|--------------------|--------|---|--------------------|---|--|
| Atitalaquia                    | 18410              | 122.02 | 150.87                                    | 7                  | 0.06                                    | 26.53  |
| Atotonilco de Tula             | 45883              | 120.88 | 379.58                                    | 3                  | 0.02                                    | 22.07  |
| Tepeji del Río de Ocampo       | 42998              | 71.24  | 603.52                                    | 2                  | 0.03                                    | 22.07  |
| Tula de Allende                | 131078             | 357.62 | 366.53                                    | 2                  | 0.01                                    | 26.53  |
| Apaxco (Estado de México)      | 16494              | 340.35 | 48.46                                     | 2                  | 0.01                                    | 22.07  |
| Huehuetoca (Estado de México)  | 155453             | 57.94  | 2683.15                                   | 4                  | 0.07                                    | 26.53  |
| Tequixquiac (Estado de México) | 40418              | 120.76 | 334.69                                    | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>TOTAL</b>                   | <b>450,734</b>     |        |   | <b>20</b>          |   |  |

Uno de los problemas más graves de esta región es la emisión de contaminantes atmosféricos. La termoeléctrica y la refinería liberan grandes cantidades de gases de efecto invernadero, como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), además de partículas en suspensión. Estas emisiones no solo contribuyen al calentamiento global, sino que también afectan directamente la calidad del aire en las localidades cercanas.

Las actividades extractivas generan, a su vez, grandes cantidades de desechos sólidos. En el caso de las cementeras, la necesidad de grandes volúmenes de materia prima, como caliza y arcilla, aumenta la presión sobre los recursos naturales locales.

En las plantas petroquímicas y químicas, los trabajadores están expuestos a compuestos tóxicos, como solventes, hidrocarburos y metales pesados, que pueden provocar intoxicaciones y enfermedades respiratorias (Robledo, 2015).

La región de Lerma, en el Estado de México, se caracteriza por su alta concentración de actividades industriales. Entre las principales instalaciones se encuentran una mina, cinco fábricas de cal y vidrio, y 61 plantas químicas y de vidrio, lo que configura un perfil económico basado en la producción

industrial. La región comprende 24 municipios, con un total de 1,929,340 habitantes (Tabla 12).

*Tabla 12. Densidad de población en la Resa de Lerma, Estado de México*

| Nombre del Municipio           | Total de Población | Km <sup>2</sup> | Densidad de Población hab/km <sup>2</sup> | Industrias Totales | Densidad de Industrias /km <sup>2</sup> | Concentración promedio de partículas micras 2.5µg/m <sup>3</sup> |
|--------------------------------|--------------------|-----------------|---|--------------------|---|--|
| <b>Almoloya de Juárez</b>      | 105272             | 479.92          | 219.35                                    | 0                  | 0                                       | 19.07  |
| <b>Almoloya del Río</b>        | 11003              | 8.50            | 1295.06                                   | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>Atizapán</b>                | 13728              | 8.50            | 1615.93                                   | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>Atlacomulco</b>             | 82821              | 261.12          | 317.18                                    | 5                  | 0.019                                   | 19.07  |
| <b>Calimaya</b>                | 69393              | 100.74          | 688.84                                    | 0                  | 0                                       | 19.07  |
| <b>Capulhuac</b>               | 28478              | 20.63           | 1380.60                                   | 2                  | 0.097                                   | 22.07  |
| <b>Chapultepec</b>             | 16279              | 14.56           | 1118.01                                   | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>Ixtlahuaca</b>              | 95425              | 334.11          | 285.61                                    | 1                  | 0.03                                    | 19.07  |
| <b>Xalatlaco</b>               | 28768              | 109.23          | 263.36                                    | 1                  | 0.09                                    | 22.07  |
| <b>Jiquipilco</b>              | 56367              | 272.38          | 206.94                                    | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>Jocotitlán</b>              | 56371              | 278.20          | 202.62                                    | 0                  | 0                                       | 19.07  |
| <b>Lerma</b>                   | 95136              | 230.35          | 413.01                                    | 22                 | 0.10                                    | 22.07  |
| <b>Metepec</b>                 | 203346             | 71.57           | 2841.13                                   | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>Mexicaltzingo</b>           | 11290              | 12.13           | 930.46                                    | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>Ocoyoacac</b>               | 34210              | 139.50          | 245.24                                    | 3                  | 0.02                                    | 19.07  |
| <b>Otzolotepec</b>             | 48467              | 113.89          | 425.56                                    | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>San Antonio La Isla</b>     | 22014              | 21.85           | 1007.68                                   | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>San Felipe del Progreso</b> | 109981             | 369.07          | 298.00                                    | 0                  | 0                                       | 19.07  |
| <b>San Mateo Atenco</b>        | 79979              | 20.62           | 3878.67                                   | 5                  | 0.2                                     | 22.07  |
| <b>Temascalcingo</b>           | 47634              | 358.78          | 132.77                                    | 0                  | 0                                       | 19.07  |
| <b>Temoaya</b>                 | 65962              | 185.33          | 355.91                                    | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>Tianguistenco</b>           | 91487              | 133.51          | 685.25                                    | 1                  | 0.01                                    | 19.07  |
| <b>Toluca</b>                  | 538404             | 429.31          | 1254.12                                   | 27                 | 0.06                                    | 19.07  |
| <b>Xonacatlán</b>              | 17525              | 53.31           | 328.71                                    | 0                  | 0                                       | 19.07  |
| <b>TOTAL</b>                   | <b>1,929,340</b>   |                 |   | <b>67</b>          |   |  |

Las fábricas de cal y vidrio constituyen otra fuente importante de contaminación atmosférica, al emitir dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). La producción de cal requiere el uso intensivo de hornos que liberan gases tóxicos y partículas finas, afectando tanto a la población cercana como a los trabajadores expuestos de manera continua durante su jornada laboral.

Las industrias químicas y de vidrio impactan los recursos hídricos de la región. Aunque cada planta genera empleo para más de 51 trabajadores, las condiciones laborales a menudo no son seguras ni adecuadas.

Dentro de la región de Lerma, los municipios más afectados incluyen Lerma, Metepec, Toluca, Ocoyoacac, Xonacatlán y Tianguistenco, debido a la alta densidad de actividades industriales y al número significativo de habitantes empleados en fábricas de cal, vidrio y química. La población enfrenta contaminación directa y degradación ambiental en su entorno.

Por su parte, la región de Tlaxcala enfrenta serios desafíos sanitarios y ambientales por la concentración industrial, donde las partículas PM<sub>2.5</sub> superan los límites establecidos en varios municipios. La RESA cuenta con un total de 658,414 habitantes (Tabla 13).

*Tabla 13. Densidad de población en la Resa de Tlaxcala, Tlaxcala*

| <b>Nombre del Municipio</b>               | <b>Total de Población</b> | <b>Km<sup>2</sup></b> | <b>Densidad de Población hab/km<sup>2</sup></b> | <b>Industrias Totales</b> | <b>Densidad de Industrias /km<sup>2</sup></b> | <b>Concentración promedio de partículas micras 2.5µg/m<sup>3</sup></b> |
|---|---------------------------|-----------------------|---|---------------------------|---|--|
| <b>Amaxac de Guerrero</b>                 | 13459                     | 9.70                  | 1387.80   | 0                         | 0   | 19.07  |
| <b>Apetatitlán de Antonio Carvajal</b>    | 9684                      | 10.91                 | 887.55  | 0                         | 0   | 19.07  |
| <b>Apizaco</b>                            | 38833                     | 41.20                 | 942.52  | 1                         | 0   | 22.07  |
| <b>El Carmen Tequexquitla</b>             | 8930                      | 60.62                 | 147.31  | 0                         | 0   | 22.07  |
| <b>Cuapiaxtla</b>                         | 12706                     | 87.30                 | 145.55  | 0                         | 0   | 22.07  |
| <b>Cuaxomulco</b>                         | 4144                      | 14.55                 | 284.85  | 0                         | 0   | 22.07  |
| <b>Chiautempan</b>                        | 54481                     | 75.19                 | 724.55  | 0                         | 0   | 22.07  |
| <b>Huamantla</b>                          | 38330                     | 343.13                | 111.71  | 1                         | 0   | 19.07  |
| <b>Mazatecochco de José María Morelos</b> | 9076                      | 13.35                 | 679.92  | 0                         | 0   | 19.07  |
| <b>Contla de Juan Cuamatzi</b>            | 32834                     | 26.68                 | 1230.82   | 0                         | 0   | 22.07  |
| <b>Tepetitla de Lardizábal</b>            | 16148                     | 21.83                 | 739.68  | 0                         | 0   | 22.07  |
| <b>Acuamanala de Miguel Hidalgo</b>       | 2432                      | 12.13                 | 200.44  | 0                         | 0   | 22.07  |
| <b>Nativitas</b>                          | 23465                     | 55.81                 | 420.47  | 0                         | 0   | 19.07  |
| <b>Panotla</b>                            | 20864                     | 64.25                 | 324.72  | 0                         | 0   | 19.07  |
| <b>San Pablo del Monte</b>                | 77926                     | 63.12                 | 1234.64   | 1                         | 0   | 19.07  |
| <b>Santa Cruz Tlaxcala</b>                | 16879                     | 26.67                 | 632.86  | 0                         | 0   | 22.07  |
| <b>Tenancingo</b>                         | 8569                      | 12.14                 | 705.96  | 0                         | 0   | 22.07  |
| <b>Teolochohco</b>                        | 23217                     | 78.86                 | 294.40  | 0                         | 0   | 19.07  |
| <b>Tepeyanco</b>                          | 7769                      | 14.56                 | 533.69  | 0                         | 0   | 22.07  |
| <b>Tetlatlahuca</b>                       | 12988                     | 26.69                 | 486.63  | 0                         | 0   | 19.07  |
| <b>Tlaxcala</b>                           | 55448                     | 54.57                 | 1016.12   | 0                         | 0   | 22.07  |
| <b>Totolac</b>                            | 9765                      | 13.34                 | 732.19  | 0                         | 0   | 19.07  |

| Nombre del Municipio             | Total de Población | Km <sup>2</sup> | Densidad de Población hab/km <sup>2</sup> | Industrias Totales | Densidad de Industrias /km <sup>2</sup> | Concentración promedio de partículas micras 2.5µg/m <sup>3</sup> |
|----------------------------------|--------------------|-----------------|---|--------------------|---|--|
| <b>Tzompantepec</b>              | 16665              | 41.21           | 404.38                                    | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>Papalotla de Xicohténcatl</b> | 26110              | 26.70           | 977.89                                    | 5                  | 0.2                                     | 19.07  |
| <b>Xicohtzinco</b>               | 14718              | 7.28            | 2021.16                                   | 1                  | 0.1                                     | 22.07  |
| <b>Zacatelco</b>                 | 33335              | 30.34           | 1098.82                                   | 0                  | 0                                       | 19.07  |
| <b>La Magdalena Tlaltelulco</b>  | 17214              | 13.34           | 1290.24                                   | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>San Damián Texóloc</b>        | 2,156              | 8.49            | 253.96                                    | 0                  | 0                                       | 19.07  |
| <b>San Francisco Tetlanohcan</b> | 8803               | 38.82           | 226.78                                    | 0                  | 0                                       | 19.07  |
| <b>San Jerónimo Zacualpan</b>    | 1866               | 7.28            | 256.37                                    | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>San José Teacalco</b>         | 5624               | 37.59           | 149.62                                    | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>San Juan Huactzinco</b>       | 5405               | 4.85            | 1113.81                                   | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>San Lorenzo Axocomanitla</b>  | 2154               | 3.64            | 591.77                                    | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>Santa Ana Nopalucan</b>       | 4359               | 9.70            | 449.30                                    | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>Santa Apolonia Teacalco</b>   | 3114               | 7.28            | 427.82                                    | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>Santa Catarina Ayometla</b>   | 9310               | 9.71            | 959.00                                    | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>Santa Cruz Quilehtla</b>      | 5455               | 6.07            | 899.15                                    | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>Santa Isabel Xiloxotla</b>    | 4179               | 6.06            | 689.04                                    | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>TOTAL</b>                     | <b>658,414</b>     |                 |   | <b>9</b>           |   |  |

En la región destacan las industrias de fundición, cal, vidrio y químicas, debido a sus emisiones contaminantes y generación de residuos peligrosos. Estas industrias emplean a más de 51 trabajadores, lo que incrementa su impacto tanto a nivel ambiental como social. Los municipios más afectados incluyen Tlaxcala, Apizaco, Zacatelco, San Pablo del Monte y Huamantla, entre otros que albergan plantas industriales de diversa índole.

Las industrias de cal y vidrio, presentes en San Pablo del Monte, Contla de Juan Cuamatzi y Nativitas, impactan principalmente la atmósfera, mediante la emisión de polvo de caliza y óxidos de azufre. Estas localidades concentran aproximadamente 134,225 habitantes, quienes también enfrentan problemas de contaminación del agua por desechos industriales.

Por su parte, las industrias químicas y de vidrio, ubicadas en municipios como Huamantla, Tetla de la Solidaridad, Tzompantepec, Papalotla de Xicohténcatl, Xicohtzinco y La Magdalena Tlaltelulco, representan una fuente significativa de contaminación hídrica y del suelo, debido a la generación de residuos peligrosos y emisiones de compuestos orgánicos volátiles. Estas comunidades suman más de 171,025 habitantes, superando la densidad poblacional de otras regiones.

El impacto de esta contaminación en los hogares incluye un incremento de enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Los niños pueden desarrollar asma y otros problemas respiratorios crónicos, mientras que los adultos mayores son más propensos a complicaciones cardíacas. Además, la exposición constante a PM<sub>2.5</sub> se ha asociado con daños neurológicos y el desarrollo de enfermedades como cáncer (Oyarzún & Valdivia, 2021).

La Región de Emergencia Sanitaria y Ambiental (RESA) del Valle de Puebla es de gran relevancia por su alta concentración poblacional y su actividad industrial. La tabla 14, la población total de los municipios que conforman esta región asciende a 1,918,696 habitantes.

*Tabla 14. Densidad de población en la Resa de Valle de Puebla, Puebla*

| <b>Nombre del municipio</b>    | <b>Total de población</b> | <b>Km<sup>2</sup></b> | <b>Densidad de población hab/km<sup>2</sup></b> | <b>Industrias totales</b> | <b>Densidad de industrias /km<sup>2</sup></b> | <b>Concentración promedio de partículas micras 2.5µg/m<sup>3</sup></b> |
|--------------------------------|---------------------------|-----------------------|---|---------------------------|---|--|
| <b>Amozoc</b>                  | 88930                     | 132.39                | 671.73  | 3                         | 0.023   | 19.07  |
| <b>Coronango</b>               | 32422                     | 38.85                 | 834.65  | 3                         | 0.077   | 22.07  |
| <b>Cuatlancingo</b>            | 87200                     | 37.64                 | 2316.94   | 6                         | 0.159   | 22.07  |
| <b>Chiautzingo</b>             | 19223                     | 84.94                 | 226.30  | 0                         | 0   | 19.07  |
| <b>Huejotzingo</b>             | 86430                     | 174.77                | 494.53  | 1                         | 0.006   | 19.07  |
| <b>Juan C. Bonilla</b>         | 15607                     | 23.07                 | 676.60  | 0                         | 0   | 19.07  |
| <b>Puebla</b>                  | 1247600                   | 541.82                | 2302.60   | 10                        | 0.018   | 19.07  |
| <b>San Andrés Cholula</b>      | 103927                    | 59.52                 | 1746.01   | 0                         | 0   | 19.07  |
| <b>San Jerónimo Tecuanipan</b> | 4237                      | 40.08                 | 105.70  | 0                         | 0   | 19.07  |
| <b>San Martín Texmelucan</b>   | 134608                    | 89.76                 | 1499.69   | 2                         | 0.02  | 19.07  |
| <b>San Miguel Xoxtla</b>       | 6046                      | 6.07                  | 996.34  | 0                         | 0   | 22.07  |
| <b>San Pedro Cholula</b>       | 85472                     | 75.29                 | 1135.21   | 0                         | 0   | 19.07  |
| <b>Tlaltenango</b>             | 3456                      | 23.06                 | 149.86  | 0                         | 0   | 22.07  |
| <b>Tlanepantla</b>             | 3538                      | 14.59                 | 242.47  | 0                         | 0   | 22.07  |

---

|              |                  |           |
|--------------|------------------|-----------|
| <b>TOTAL</b> | <b>1,918,696</b> | <b>25</b> |
|--------------|------------------|-----------|

---

La mayor concentración de población se localiza en la capital de Puebla, con 1,247,600 personas, seguida por San Martín Texmelucan con 134,608 y San Andrés Cholula con 103,927 habitantes. Estos municipios son centros urbanos que atraen trabajadores debido a su cercanía con zonas industriales.

La presencia de 22 industrias químicas y de papel, así como 2 de cal y vidrio, representa un riesgo significativo para la salud de la población, debido a la emisión de contaminantes y residuos peligrosos, como dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno y material particulado PM<sub>2.5</sub>, que afectan la calidad del aire.

Los trabajadores de estas industrias se encuentran expuestos de manera directa y prolongada a los contaminantes presentes en el aire, lo que incrementa los riesgos para su salud, especialmente en instalaciones que carecen de equipos de protección adecuados.

En los municipios de la región de Libres-Oriental, Puebla y Veracruz, la exposición de la población se considera significativa a pesar de la ausencia de industrias pesadas como químicas, papeleras, de cal y vidrio, minas, petroquímicas, refinerías, termoeléctricas, cementeras y fundiciones. La región enfrenta problemas ambientales diversos que generan una crisis ambiental y sanitaria.

En cuanto a la distribución de la población, los municipios presentan los siguientes habitantes (Tabla 15): Libres con 15,567; Oriental con 12,437; y Perote, Veracruz, con 63,412, sumando un total de 91,416 habitantes. Esta población se encuentra expuesta a diversas problemáticas ambientales que afectan su calidad de vida y salud.

Tabla 15. Densidad de población en la Resa de Libres Oriental, Puebla y Veracruz

| Nombre del Municipio            | Total de Población | Km <sup>2</sup> | Densidad de Población hab/km <sup>2</sup> | Industrias Totales | Densidad de Industrias /km <sup>2</sup> | Concentración promedio de partículas micras 2.5µg/m <sup>3</sup> |
|---------------------------------|--------------------|-----------------|---|--------------------|---|--|
| <b>Aljojuca</b>                 | 3384               | 50.99           | 66.36                                     | 0                  | 0                                       | 19.07  |
| <b>Cuyoaco</b>                  | 13679              | 302.62          | 45.20                                     | 0                  | 0                                       | 19.07  |
| <b>Chalchicomula de Sesma</b>   | 35250              | 393.69          | 89.54                                     | 0                  | 0                                       | 19.07  |
| <b>Guadalupe Victoria</b>       | 9727               | 230.39          | 42.22                                     | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>Libres</b>                   | 15567              | 273.79          | 56.86                                     | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>Oriental</b>                 | 12437              | 234.02          | 53.15                                     | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>San Nicolás Buenos Aires</b> | 7697               | 207.47          | 37.10                                     | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>Tepeyahualco</b>             | 16077              | 451.84          | 35.58                                     | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>Tlachichuca</b>              | 23661              | 421.23          | 56.17                                     | 0                  | 0                                       | 19.07  |
| <b>Perote</b>                   | 63412              | 605.50          | 104.73                                    | 0                  | 0                                       | 22.07  |
| <b>TOTAL</b>                    | <b>200,891</b>     |                 |   | <b>0</b>           |   |  |

Aunado a la densidad poblacional, la agricultura contribuye de manera importante a la contaminación, debido al uso de pesticidas y fertilizantes, que afectan tanto la calidad del suelo como del aire, generando problemas de salud en la población (Boonupara et al., 2023).

Aunque la región no cuenta con industrias pesadas analizadas en esta investigación, su proximidad a complejos industriales ubicados en los estados de Puebla y Veracruz implica que los contaminantes puedan ser transportados por el viento y afectar a los municipios locales (Tabla 16).

En Puebla, se concentran industrias automotrices y textiles, mientras que en Veracruz la presencia de refinerías y plantas petroquímicas contribuye a la contaminación ambiental. Además, el uso intensivo de combustibles fósiles en transporte, vehículos de carga y maquinaria agrícola incrementa la emisión

La región del Istmo Norte, en Veracruz, es una de las más industrializadas del estado, con diversas industrias pesadas y manufactureras. Según la información de la Tabla 12, la población total expuesta asciende a 507,598 habitantes, distribuidos en los municipios que conforman la RESA, lo que evidencia un alto riesgo por contaminación.

Entre las industrias presentes se encuentran cuatro plantas petroquímicas, una refinería, una planta de cal y vidrio, doce industrias químicas y de papel, así como una mina.

*Tabla 16. Densidad de población de Istmo Norte, Veracruz*

| <b>Nombre del Municipio</b>                 | <b>Total de Población</b> | <b>Km<sup>2</sup></b> | <b>Densidad de Población hab/km<sup>2</sup></b> | <b>Industrias Totales</b> | <b>Densidad de Industrias /km<sup>2</sup></b> | <b>Concentración promedio de partículas micras 2.5µg/m<sup>3</sup></b> |
|---|---------------------------|-----------------------|---|---------------------------|---|--|
| <b>Coatzacoalcos</b>                        | 211261                    | 321.15                | 657.82  | 10                        | 0.0311  | 19.07  |
| <b>Cosoleacaque</b>                         | 62623                     | 271.27                | 230.85  | 2                         | 0.0074  | 19.07  |
| <b>Chinameca</b>                            | 5914                      | 174.69                | 33.85   | 0                         | 0   | 19.07  |
| <b>Ixhuatlán del Sureste</b>                | 10685                     | 161.32                | 66.23   | 0                         | 0   | 22.07  |
| <b>Jáltipan</b>                             | 40384                     | 319.18                | 126.52  | 1                         | 0.0031  | 19.07  |
| <b>Minatitlán</b>                           | 130821                    | 2126.11               | 61.53   | 4                         | 0.0019  | 22.07  |
| <b>Oteapan</b>                              | 15007                     | 20.78                 | 722.33  | 0                         | 0   | 19.07  |
| <b>Zaragoza</b>                             | 98992                     | 22.00                 | 4499.12   | 0                         | 0   | 19.07  |
| <b>Nanchital de Lázaro Cárdenas del Río</b> | 21004                     | 28.10                 | 747.56  | 1                         | 0.036   | 22.07  |
| <b>TOTAL</b>                                | <b>507,598</b>            |                       |   | <b>18</b>                 |   |  |

Los municipios con mayor cantidad de habitantes son Coatzacoalcos, con 211,261; Minatitlán, con 130,821; Cosoleacaque, con 62,623; Jáltipan, con 40,384; y Nanchital de Lázaro Cárdenas del Río, con 21,004 habitantes. Estos municipios concentran la mayor población en riesgo debido a la proximidad con la refinería y las plantas petroquímicas. Coatzacoalcos y Minatitlán, en particular, se consideran focos críticos por su alta densidad poblacional y la presencia de instalaciones industriales de alto impacto ambiental.

Además de los problemas ambientales, las familias de los trabajadores también enfrentan riesgos significativos. Los empleados expuestos a altas concentraciones de contaminantes, como material particulado fino (PM<sub>2.5</sub>), pueden transportar estas partículas a sus hogares, afectando especialmente a niños y adultos mayores, quienes son más vulnerables a sus efectos (CDC, 2019; Nieto & Mazzáfero, 1999; Orpella et al., 2007).

De acuerdo con la concentración de partículas PM<sub>2.5</sub>, que superan los límites máximos permisibles establecidos en la Norma Oficial Mexicana (NOM-025-SSA1-2021), existe un riesgo importante para la población de las regiones

expuestas. Esto subraya la necesidad de atención, monitoreo y capacitación sobre las problemáticas que enfrentan las RESA.

Entre las ocho regiones analizadas, se evidencia que la más afectada es el Valle del Mezquital, con una concentración promedio de  $23.68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , superando a las otras RESA, cuyas concentraciones promedio se mantienen por debajo de  $20.96 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . No obstante, incluso en estas otras regiones, los niveles exceden lo permitido por la norma.

La elevada concentración del Valle del Mezquital se relaciona con la presencia de industria cementera, refinería, termoeléctrica y petroquímica, que en conjunto tiene un impacto significativo en el ambiente.

Sin embargo, la RESA de Libres-Oriental, Puebla y Veracruz, no cuenta con ninguna de las ocho industrias analizadas. A pesar de ello, presenta una concentración promedio de  $20.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , lo que indica un nivel elevado de contaminación. Esto puede explicarse por factores como la contaminación vehicular, incendios, y la posible influencia de RESA cercanas, como Tlaxcala y Valle de Puebla, dado que las partículas atmosféricas no respetan delimitaciones administrativas.

#### **8.4 Análisis de regionalizaciones por $\text{PM}_{2.5}$ y propuesta de nuevas RESA's**

La contaminación del aire constituye un problema ambiental y de salud pública de gran relevancia a nivel mundial, y en México, el estudio de la concentración de material particulado fino ( $\text{PM}_{2.5}$ ) resultó esencial para comprender sus efectos a largo plazo. A partir de los datos obtenidos, se clasificaron cinco clústeres principales, que permiten visualizar las zonas con mayor exposición al contaminante.

En México, se han reconocido ocho Regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental (RESA) debido a la alta concentración de actividades industriales; no obstante, el crecimiento industrial reciente en diversas áreas del país sugiere la posible existencia de nuevas regiones con problemáticas ambientales relevantes, que requieren un monitoreo más detallado y la implementación de estrategias de gestión ambiental integrales.

En este contexto, dicho análisis tiene como objetivo identificar zonas fuera de las establecidas que podrían considerarse como regiones de emergencia sanitaria y ambiental (Azamar Alonso & Téllez- Ramírez, 2021; Barreda Marín, 2023). Se consideró la distribución de industrias como cementeras, minas, refinerías, petroquímicas, termoeléctricas y fundiciones, con un mapeo detallado de su ubicación.

Como se mencionó en el primer apartado, se han identificado varias regiones en la zona centro del país; de las ocho consideradas, siete presentan presencia industrial. No obstante, también se evaluó la región de Libres-Oriental, Puebla y Veracruz, a pesar de no contar con industrias pesadas de gran tamaño, debido a la influencia de actividades industriales cercanas.

Esta región registró concentraciones elevadas de  $PM_{2.5}$ , lo que resalta la importancia de incluirla dentro del análisis, dado su potencial riesgo ambiental y sanitario.

De acuerdo con las regionalizaciones de  $PM_{2.5}$ , las zonas con alta densidad industrial coinciden con concentraciones elevadas de partículas finas. Este fenómeno, como se observa en la Figura 34, no es un hecho aislado, sino que se repite en diversas regiones del país, lo que indica la existencia de patrones comunes y resalta la necesidad de implementar estrategias integrales para su mitigación.

El análisis basado en clústeres de concentración de  $PM_{2.5}$  permitió clasificar los valores en cinco categorías, numeradas del 1 al 5, donde los tonos verdes representan bajas concentraciones y los tonos rojizos indican niveles más altos de contaminación. Esta representación visual facilita la identificación de patrones espaciales, mostrando que los mayores niveles de contaminación se concentran en regiones industriales y urbanas, mientras que las zonas rurales y costeras presentan una mejor calidad del aire (Figura 34).

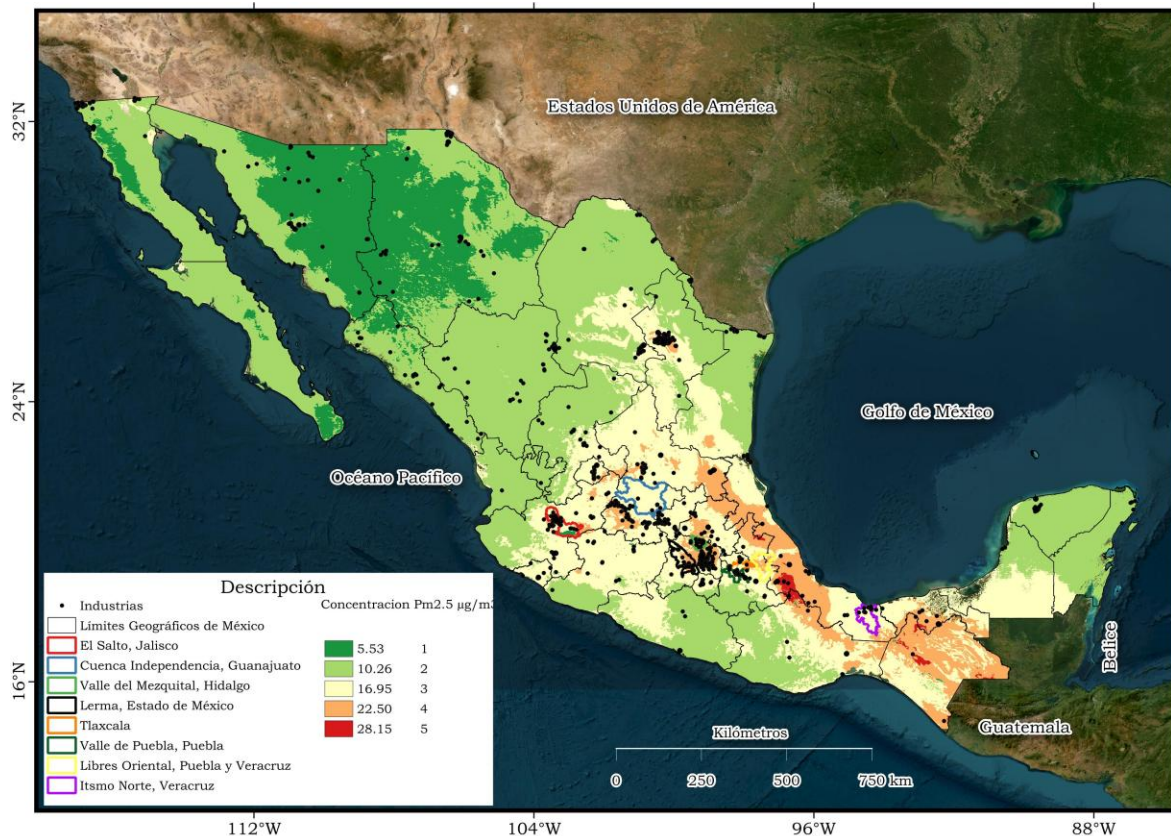


Figura 34. Regionalización

Las regionalizaciones 1 y 2, con valores de 5.53 y 10.26  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , representan concentraciones bajas de  $\text{PM}_{2.5}$ , que se localizan principalmente en regiones rurales, montañosas y selváticas. Estas áreas incluyen partes de la Sierra Madre Occidental, la Sierra Madre Oriental, y la Península de Yucatán.

La baja concentración en estas zonas está relacionada con una menor actividad industrial y urbana, además de la capacidad natural de la vegetación para capturar y filtrar contaminantes, encontrando concentraciones dentro de los límites permitidos por parte de la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021 de 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En contraste, las regionalizaciones de 16.95 y 22.50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , están distribuidos en extensas áreas del país. Estas categorías cubren gran parte del territorio nacional, acentuándose en mayor medida en algunos estados como Michoacán, Querétaro Ciudad de México, el Estado de México, Puebla, y Tlaxcala, así como zonas del Bajío y parte del norte de Veracruz.

La categoría de 28.15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  que representan las concentraciones más altas de  $\text{PM}_{2.5}$ , tienen una distribución más limitada pero crítica. Estas zonas

incluyen partes del norte de México, como Monterrey y su área metropolitana, y sectores del corredor industrial del centro del país. La concentración elevada en estas áreas se debe a la combinación de factores como la actividad industrial intensiva y la topografía, que puede dificultar la dispersión de contaminantes.

*Tabla 17. Kilómetros cuadrados en regionalización*

| <b>Número de Regiones</b> | <b>Área en km<sup>2</sup></b> | <b>Total de Población</b> | <b>Industrias por km<sup>2</sup></b> | <b>Concentración de partículas micras 2.5µg/m<sup>3</sup></b> |
|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|---|
| <b>1</b>                  | 285,601.81                    | 1,361,993                 | 1.05                                 | 5.53  |
| <b>2</b>                  | 980,634.40                    | 27,049,251                | 1.89                                 | 10.26   |
| <b>3</b>                  | 519,172.48                    | 44,630,543                | 6.95                                 | 16.95   |
| <b>4</b>                  | 148,246.97                    | 51,077,714                | 35.07                                | 22.50   |
| <b>5</b>                  | 7,171.73                      | 4,689,759                 | 105.97                               | 28.15   |
| <b>Total</b>              | 194,0827.38                   | 128,809,260               |                                      |   |

De acuerdo con el DENU, se cuenta con una densidad industrial de 3.04 industrias por km<sup>2</sup> a nivel nacional en el que se puede observar que a partir de la región tres a la cinco están por arriba de lo nacional, estas regiones abarcan de la parte centro al sur del país donde se ubican los corredores industriales de mayor importancia.

En la región tres (Tabla 17) representa una transición entre una industrialización e impactos ambientales. Su densidad industrial promedio de 4.96 industrias por km<sup>2</sup>, en combinación con una concentración de 16.95 µg/m<sup>3</sup> de partículas PM<sub>2.5</sub>, este se localiza en el centro-occidente del país, abarcando los estados de Guanajuato, Querétaro, Michoacán, Jalisco.

La región 4 cuenta con una densidad industrial de 35.07 industrias/km<sup>2</sup>, elevada concentración de PM<sub>2.5</sub> 22.50 µg/m<sup>3</sup>) y una población superior a los 51 millones. Se trata del grupo más extenso entre las regiones de alta presión ambiental (Tabla 17).

En el mapa (figura 34) se ubica en el centro del país, incluyendo zonas del Valle del Mezquital (Hidalgo), Tlaxcala, Lerma (Estado de México) y corredores industriales adyacentes a la Zona Metropolitana del Valle de México. Los

niveles de PM<sub>2.5</sub> indican una exposición permanente a contaminantes que afectan directamente a la salud pública y de los trabajadores.

La región 5, constituye un colapso ambiental urbano-industrial en México. Con una densidad de 35.07 industrias por kilómetro cuadrado siendo la más alta de todo el conjunto analizado, esta categoría territorial se configura como una zona de sacrificio metropolitano estructural, donde la convivencia entre población e industria ha llegado a un punto de saturación crítica (Tabla 17).

Esta es una región de alta exposición por las condiciones ambientales que se presentan con el valor más alto de partículas micra 28.15 µg/m<sup>3</sup>, asimismo la combinación de ruido, calor y contaminantes químicos, generan un espacio contaminado, en la que el territorio ha sido explotado al límite y donde la vida se desarrolla en condiciones de toxicidad constante.

Las regiones con alta densidad poblacional e infraestructura industrial, genera emisiones persistentes de PM<sub>2.5</sub> a partir de procesos de combustión de las industrias, la concentración de industrias y la quema de combustibles fósiles contribuyen significativamente a la degradación de la calidad del aire en cualquier zona de México.

Sin embargo, los problemas ambientales y sanitarios en México siguen en una constante evolución y presentando nuevos retos para la población. Entre los que se destaca la alta concentración de partículas en el aire y el aumento de densidad de industrias en ciertas zonas del país.

La exposición constante a los niveles de PM<sub>2.5</sub> puede ocasionar enfermedades respiratorias, cardiovasculares en los que afecta principalmente a los sectores más vulnerables (Becerra Pérez et al., 2020; OMS, 2025; Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2021; US EPA, 2016, 2018).

Además, de la acumulación de industrias en zonas específicas que no llevan un control adecuado de sus emisiones tóxicas, aumenta el riesgo de contaminación y agudiza los problemas de salud pública y el medio ambiente.

La delimitación de las ocho Regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental (RESA's) en México se realizó originalmente a partir de la identificación de áreas del territorio nacional donde coinciden geográficamente actividades

agrícolas, mineras y manufactureras. Estas regiones fueron trazadas tomando como base los límites municipales.

Ante esta situación, se realizó la propuesta de nuevas Regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental en aquellas zonas donde coinciden altas concentraciones de partículas finas ( $PM_{2.5}$ ), de industrias y densidad poblacional convergen, y que estas en conjunto representan un riesgo para la salud y el ambiente.

Las concentraciones de mayor valor van de 22.50 hasta más de 28.15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , se asocian con áreas de actividad industrial, lo que permite identificar zonas que pueden considerarse regiones de emergencia sanitaria y ambiental debido a la persistencia de la contaminación atmosférica.

En este sentido, la propuesta de nuevas RESA's parte de una visión más dinámica y realista del territorio, reconociendo que los impactos ambientales no pueden ser contenidos dentro de divisiones geográficas rígidas. La nueva delimitación se fundamenta en la identificación de zonas donde la concentración de industrias emisoras de  $PM_{2.5}$  sobrepasa los valores permisibles y donde la densidad poblacional está en constante riesgo.

La región identificada en la zona noreste de México es Nuevo León siendo una de las entidades más industrializadas dentro de México y presenta altos niveles promedio de contaminación ambiental.

La concentración industrial en Nuevo León, particularmente en el área metropolitana de Monterrey y sus alrededores, es un fenómeno que destaca por su magnitud y diversidad. Esta región se ha consolidado como uno de los principales centros industriales de México, teniendo una amplia gama de actividades que van desde la petroquímica y la generación de energía hasta la industria minera, cementera, de cal y vidrio, de fundición, y química y papel (Figura 35).

Esta concentración en parte se debe a la refinería Ing. Héctor R. Lara Sosa en Cadereyta, una de las principales plantas de procesamiento de petróleo en el

país, que opera cerca de otras instalaciones como la termoeléctrica Iberdrola energía Monterrey, ubicada en Monterrey (Figura 35).

Esta cercanía potencia el impacto ambiental acumulativo, debido a que ambas instalaciones son fuentes importantes de emisiones de gases contaminantes como partículas finas ( $PM_{2.5}$ ), que incrementa la carga de contaminantes atmosféricos en una región vulnerable por la presencia de industrias pesadas.

En el sector cementero, la situación no es diferente. Las tres principales plantas cementeras de la región, CEMEX México Planta Hidalgo, CEMEX Planta Monterrey y Holcim Apasco Planta Mitras, se ubican dentro de su área metropolitana o en sus inmediaciones.

Estas instalaciones son fundamentales para el sector de la construcción, pero su operación implica procesos que generan emisiones de partículas finas. Esto se suma a las afectaciones que la minería, con cinco minas distribuidas en la región, causa en términos de contaminación del suelo y alteraciones al paisaje natural.

Las tres minas de roca caliza ubicadas en Monterrey, General Escobedo junto con las minas de sílice y barita, generan polvo y partículas suspendidas que agravan los problemas de la población (Figura 35).

A la minería y las cementeras se suma la industria de cal y vidrio, que cuenta con 11 instalaciones distribuidas en municipios como Apodaca, García, Monterrey, General Escobedo y Santa Catarina. Este sector, junto con las 11 plantas de fundición en municipios como Apodaca, García, General Zuazua y Santa Catarina, genera emisiones de metales pesados y compuestos orgánicos; la situación se agrava con la industria química y papelera, que es la más numerosa, con 130 instalaciones repartidas en toda la región.



a otra, incrementando los riesgos sanitarios en zonas que ya presentan condiciones altas de contaminación (Camacho García & Flamand, 2008; National Institute of Environmental Health Sciences, 2023).

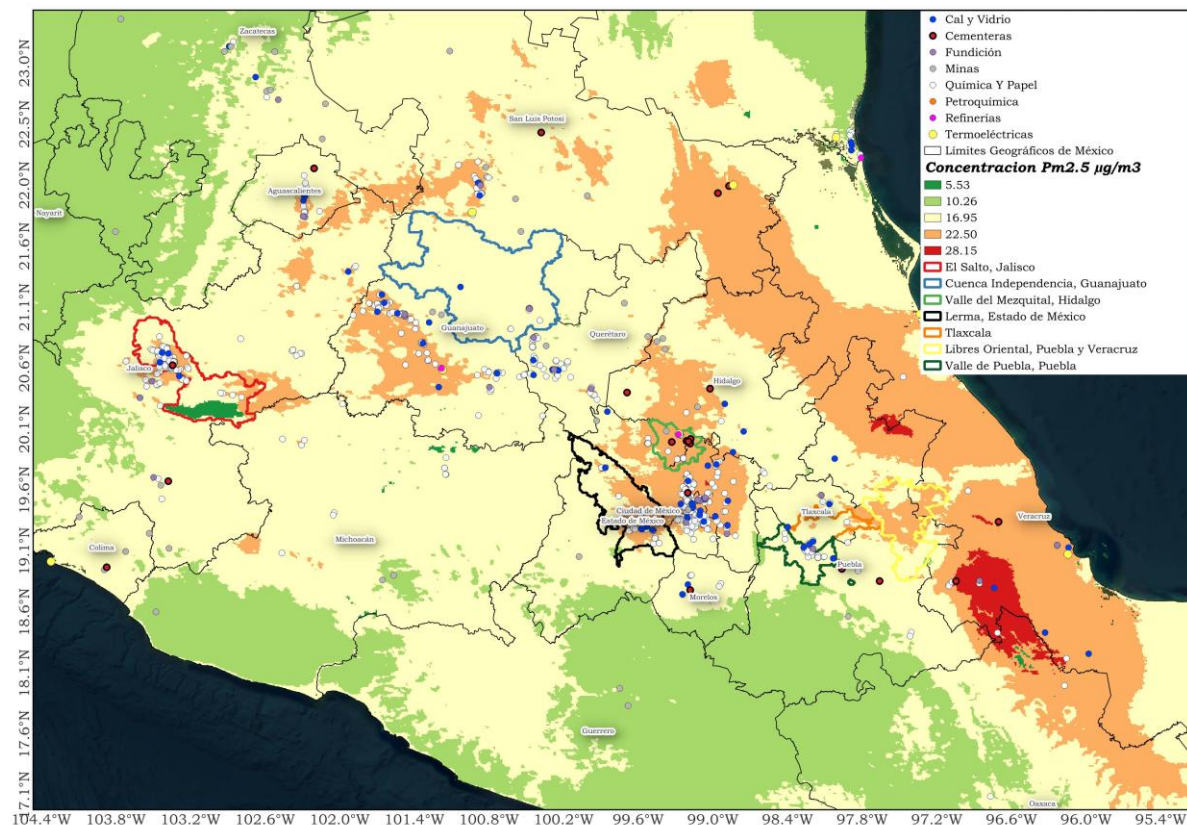


Figura 36. Propuesta de nuevas RESA's

Otra región se ubicaría correspondía al centro del país, donde se encontraba una de las mayores concentraciones de contaminación atmosférica. Esta zona abarcaba el Valle de México, el Estado de México, Hidalgo, Tlaxcala y parte de Puebla, y se caracterizaba por tonos naranja y rojo claro en el mapa, con valores entre 22 y 28 µg/m<sup>3</sup>.

Aquí se localizaban dos Regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental (RESAs) de gran relevancia: el Valle del Mezquital (en Hidalgo) y la RESA de Lerma (en el Estado de México). Ambas se encontraban muy cercanas a la Ciudad de México y su zona conurbada, donde también se registraban concentraciones elevadas de contaminantes.

La presencia de múltiples actividades industriales, entre ellas cementeras, refinerías, termoeléctricas, y plantas de cal, vidrio y papel, ha generado un

foco de contaminación atmosférica que se extiende a lo largo del corredor industrial del Valle de México.

Las concentraciones más elevadas de material particulado fino ( $PM_{2.5}$ ), que alcanzan valores superiores a  $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , se observan principalmente en el corredor industrial (Valle del Mezquital) que abarca desde Tula, Hidalgo, hasta acabar en Apaxco del Estado de México. Este corredor, se ha convertido en un foco de riesgo ambiental por las constantes provenientes de procesos industriales y otros factores.

De manera similar, en la RESA de Lerma, ubicada al poniente del Estado de México, existía una alta concentración de industrias químicas, papeleras y cementeras, cuyos efectos se combinaban con las emisiones del Valle de Toluca y la Ciudad de México.

Esta cercanía entre la capital y las RESA's de Lerma y el Valle del Mezquital generaba una continuidad atmosférica de contaminación, donde las emisiones industriales se desplazaban dentro de una misma cuenca, intensificando los niveles de  $PM_{2.5}$  en toda la región.

La presencia industrial en esta región ha generado cambios en la dinámica social y económica de su población. La expansión de parques industriales y la instalación de fuentes han reducido la disposición de zonas no contaminadas, orillando a muchas personas a vivir en espacios con altos niveles de contaminación.

La ubicación geográfica y la configuración territorial del Valle de México desempeñan un juego crucial en la perseverancia de la contaminación atmosférica.

La composición de factores como los son la inversión térmica, la urbanización acelerada y la actividad industrial en zonas de alta concentración poblacional, ha generado un entorno de deterioro ambiental crítico, la calidad del aire en la Ciudad de México y zonas del estado de México seguirán siendo un riesgo importante para la salud y bienestar de sus pobladores.

En conjunto, el corredor industrial del Valle del Mezquital, el norte del Estado de México y la Ciudad de México conforman una gran región de emergencia

sanitaria y ambiental, donde confluyen la densidad poblacional, la concentración industrial y las condiciones atmosféricas adversas.

La figura 36, muestra una de las zonas críticas del sureste mexicano en cuanto a concentración de partículas finas  $PM_{2.5}$ , en Veracruz. En esta región se observan niveles de contaminación que alcanzan los  $28.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , el valor más alto de la regionalización. Este se extiende desde la parte centro-norte del estado de Oaxaca hasta Veracruz.

Lo más importante es que, dentro de esta área, se localizan industrias de impacto ambiental, entre ellas las cementeras, fundición, cal y vidrio, químicas y papeleras y la cercanía de una termoeléctrica.

Se observa un patrón geográfico relevante: la contaminación no se limita a los puntos industriales, sino que se expande territorialmente en dirección norte y noroeste, lo cual sugiere un efecto acumulativo y de transporte de contaminantes que sobrepasa los límites municipales. Por ello, la delimitación de esta zona como una Región de Emergencia Sanitaria y Ambiental (RESA) resulta justificada, ya que no sólo presenta una densidad considerable de industrias altamente emisoras, sino que también muestra una concentración persistente y extendida de contaminantes atmosféricos que supera los valores considerados seguros por la OMS ( $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  anuales).

En Aguascalientes, los valores de  $PM_{2.5}$  se mantuvieron aproximadamente en  $22.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , con una distribución espacial concentrada en la parte central del estado. En esta zona se observaron industrias mineras, de cal y de fundición, las cuales coincidieron con los puntos donde se registraron las mayores concentraciones de partículas finas (figura 36).

Cabe señalar que esta propuesta de nuevas RESA's no excluye la posibilidad de considerar otras regiones del país que requieran una intervención. Existen más regiones que pueden estar afectadas de forma ambiental de igual o mayor gravedad y que, por diversas razones, no son clasificadas.

En algunos casos, la falta de información y estudios sobre la calidad ambiental en áreas puede dejar afuera regiones que enfrentan problemas iguales o peores a estas. Por ello, esta propuesta es un punto de inicio, por lo

que es necesario ampliar esta investigación para obtener una visión más clara de los problemas ambientales que atraviesa el país y otras regiones.

Aunado a que existen factores adicionales que influyen en el peligro de una crisis ambiental en regiones determinadas, existiendo áreas donde la urbanización ha desplazado ecosistemas naturales, aumentando que la población sea vulnerable a problemas ambientales, otro factor a analizar en la contaminación ambiental es la afluencia de la densidad vehicular en las regiones. La cantidad de automóviles en circulación contribuye significativamente a la emisión de gases contaminantes(Herrera et al., 2014; Quiñones & González, 2019).

Esta investigación puede contribuir en la mejora de las Normas Oficiales respecto al monitoreo de las condiciones de la calidad del aire, en el que con la regionalización en combinación con la densidad de industrias y de población, se identificaron las zonas con concentraciones de contaminantes altas que superan los límites, esto de igual forma ayudaría restablecer los estándares permitidos por parte del gobierno y el fortalecimiento en regiones que no tienen monitoreo continuo que presentan esta situación.

## 9. Conclusiones

El directorio estadístico nacional de unidades (DENUE) del INEGI, en conjunto con una revisión bibliográfica de las industrias más contaminantes, permitió seleccionar las industrias analizadas en el presente estudio. Sin embargo, a partir de la estructuración y análisis del DENUE, se identificaron algunos errores de ubicación de algunas industrias, así como datos faltantes, por lo que se tuvo que hacer un procedimiento extra para identificar los puntos exactos de las industrias.

El tipo de industrias que se localizan en las RESA pueden generar una considerable cantidad de impactos negativos a la población que se encuentra expuesta con las partículas contaminantes.

La generación de regionalizaciones permitió identificar diversas áreas que no han sido catalogadas como RESA, asimismo, es importante mencionar que el presente estudio incluyó la densidad de población, lo que permite analizar la población que se encuentra expuesta siendo uno de los principales aportes del proyecto de investigación.

El análisis de regionalizaciones en este estudio permitió la identificación de cinco categorías distintas que van de la más baja a la más alta con las concentraciones de partículas finas, cada una de estas categorías reflejó los patrones en la que se distribuye la contaminación, permitiendo sintetizar y clasificar de los datos ambientales en regiones con problemáticas, la categorización permitió identificar las zonas de mayor y menor contaminación.

Se observó que las regiones con mayor concentración de contaminantes e industrias se ubican principalmente en zonas centro y norte del país, en contraste que las áreas con menor nivel de contaminación se localizan en el sur y sureste del mismo, donde se aprecia dispersión de estos.

El análisis de las concentraciones de contaminantes es importante ya que las industrias analizadas sobrepasan los límites permisibles tanto nacionales con internacionales.

Otro factor importante es conocer los criterios que se consideraron para clasificar la RESA de Libres Oriental en Puebla y Veracruz debido, a que con el análisis que se realizó, esta RESA no cuenta con ninguna de las industrias que se consideró en el presente estudio, por lo que es necesario, profundizar en el criterio que para clasificar una RESA, ya que en el concepto original se menciona que debe tener industrias manufactureras y extractivas.

Siendo importante que a partir de las investigaciones previas se mencionó que la industria extractiva y manufacturera en lo que se sugiere la incorporación de otras industrias como lo son las que se analizan en este presente estudio y que la delimitación de las regiones no conoce límites estatales, siendo un factor importante el viento que es encargado de transportar los contaminantes a cualquier otra zona, porque estos no se encuentran estáticos en la zona en donde se producen.

Se sugiere una mejora en los límites permisibles y que abarcan cada una de las RESA's y se contribuye en analizar otros factores que se puedan atribuir en la búsqueda de nuevas regiones a lo largo del país y no solo sea estudiada la parte centro del país.

Es importante mencionar que no solo las ocho RESA identificadas en la zona centro del país presentan condiciones de contaminación, a partir de este estudio realizado, se considera importante ampliar el análisis a nivel nacional, dado a que se identificaron zonas con alta concentración industrial, densidad de población y concentración de materia particulada, como lo son las propuestas en este estudio, por ejemplo la zona centro del Nuevo León tiene características similares a la del Valle del Mezquital.

Es relevante considerar la retroalimentación entre diversos factores que intervienen en la generación y distribución de contaminantes atmosféricos, además de la actividad industrial.

Entre ellos se encuentran los incendios forestales, los cuales liberan grandes cantidades de humo y partículas finas ( $PM_{2.5}$ ) que, debido a su tamaño y peso, pueden ser transportadas por las corrientes de aire a zonas lejanas del foco de emisión, afectando regiones donde no se originó el incendio(US EPA, 2018).

Otro factor son los vehículos automotrices primordialmente a los que usan combustibles fósiles y que estos son usados en zonas en donde existe densidad de población alta. Lo que tiende a que las concentraciones de partículas vayan al alza.

En esta tesis, se analiza la separación de las posibles fuentes de contaminación dentro de las regiones que presentan condiciones de emergencia sanitaria y ambiental.

El propósito es observar cómo distintos factores podrían coincidir espacial y temporalmente, generando concentraciones elevadas de  $PM_{2.5}$  en determinados periodos.

Este tipo de análisis busca comprender la complejidad del fenómeno atmosférico y reconocer que las variaciones observadas no necesariamente se deben a una única fuente emisora.

Así, se mantiene abierta la interpretación de los resultados, considerando que la contaminación atmosférica puede ser el resultado de una combinación de procesos naturales, actividades humanas y condiciones climáticas específicas.

El análisis realizado en la presente investigación es una herramienta para el gobierno y autoridades ambientales para reconocer regiones en donde hay una alta carga de contaminación, lo que posibilitaría la implementación y regulación de normas y políticas, asimismo para la mejora de atención médica.

El análisis espaciotemporal del contaminante atmosférico  $PM_{2.5}$  permite comprender de manera integral los patrones de distribución, concentración y persistencia de este contaminante a lo largo del tiempo y el espacio. Los resultados obtenidos evidencian que la evolución del  $PM_{2.5}$  no es homogénea, sino que responde a una combinación de factores geográficos, climáticos y antrópicos que determinan su comportamiento en distintas regiones.

Persisten las zonas donde las concentraciones se mantienen elevadas o con variaciones mínimas, lo que sugiere la existencia de fuentes emisoras constantes o condiciones atmosféricas que favorecen su acumulación.

Los efectos producidos por esta evolución del  $PM_{2.5}$  son múltiples y de alta relevancia ambiental y social. Desde lo ecológico, la persistencia de concentraciones se contribuye al deterioro de ecosistemas afectando la vegetación. En el ámbito de la salud pública, el  $PM_{2.5}$  representa uno de los principales riesgos ambientales, asociado al incremento de enfermedades.

Finalmente, la hipótesis planteada fue comprobada ya que la regionalización permitió la propuesta a nuevas RESA's que presentan alta densidad industrial y concentraciones de materia particulada 2.5, que genera un impacto en el ambiente y en la salud humana.

## 10. Recomendaciones

Para profundizar en los estudios sobre contaminación, es importante considerar también aquellas industrias que, aunque individualmente generan un menor impacto, y que pueden tener efectos significativos debido a su distribución geográfica y al volumen acumulado de emisiones. Algunos aspectos e industrias que se deben considerar, es por ejemplo, la industria textil, los incendios forestales, la industria de ensamble automotriz y la alimentaria.

Se recomienda para proyectos posteriores incluir las industrias consideradas en el presente estudio, analizando, a su vez, las que tienen un número de personal ocupado menor a 50, para analizar la distribución espaciotemporal de estas industrias. Además, es importante analizar la población que se encuentra expuesta en las Regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental, por lo que es indispensable realizar un estudio más exhaustivo acerca de los impactos en la salud.

Es necesario aplicar las Normas Oficiales Mexicanas, por ejemplo, la NOM-025-SSA1-2021 que establece los criterios de calidad del aire con respecto a materia particulada 2.5 y de igual manera replantear en la norma que cada una de estas industrias cumpla con lo requerido para no generar un impacto ambiental o sanitario.

Se recomienda, identificar las industrias que no cumplen con lo establecido por las Normas Oficiales Mexicanas e instituciones internacionales como la OMS o la EPA, por ejemplo, las refinerías y termoeléctricas que usan el combustóleo, que es un material prohibido en sus procesos. Asimismo, en este tipo de estudios, es importante evaluar otros aspectos como la contaminación e impacto en agua y suelo.

Además, de analizar en cada zona los niveles de concentración de materia particulada antes y después de la instalación de una industria contaminante, para observar si hay un aumento de concentraciones de este contaminante. Finalmente, es necesario analizar otros contaminantes criterio en el territorio mexicano, como SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO y O<sub>3</sub>, así como las condiciones de los

trabajadores que laboran en las industrias, ya que, se encuentran directamente expuestos.

## 11. Referencias bibliográficas

- Abubakar Siddique, H. M., & Kiani, A. K. (2020). *Industrial pollution and human health: Evidence from middle-income countries—PubMed*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31997247/>
- Adebiyi, F. M. (2022). Air quality and management in petroleum refining industry: A review. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 4, 89-96. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2022.02.001>
- Afrad, M. S. I., Monir, M. B., Haque, M. E., Barau, A. A., & Haque, M. M. (2020). Impact of industrial effluent on water, soil and Rice production in Bangladesh: A case of Turag River Bank. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 18(2), 825-834. <https://doi.org/10.1007/s40201-020-00506-8>
- Aguilar-Sánchez, G., & De La Rosa-Mejía, E. (2018). Valoración Económica del Agua en la Cuenca Alta del Río Lerma, México. *Revista de Estudios Andaluces*, 35, 101-122. <https://doi.org/10.12795/rea.2018.i35.04>
- Ajanovic, S., & Varo, R. (2022). 1. *Vulnerabilidad de los niños e impacto del cambio climático en la salud infantil*. 15.
- Akey, P., & Appel, I. (2021). The Limits of Limited Liability: Evidence from Industrial Pollution. *The Journal of Finance*, 76(1), 5-55. <https://doi.org/10.1111/jofi.12978>
- Alabdullah, M. A., Gomez, A. R., Vittenet, J., Bendjeriou-Sedjerari, A., Xu, W., Abba, I. A., & Gascon, J. (2020). A Viewpoint on the Refinery of the Future: Catalyst and Process Challenges. *ACS Catalysis*, 10(15), 8131-8140. <https://doi.org/10.1021/acscatal.0c02209>
- Alan, J., & Jia, X. (2006). Remote sensing digital image analysis: An introduction. *Remote sensing digital image analysis: an introduction*.
- Alarcon Ruiz, E., Caballero Briones, F., & Merino, M. A. (2023). *Red ciudadana de monitoreo de la calidad del aire de la zona metropolitana del sur de Tamaulipas*. [https://www.researchgate.net/publication/377756851\\_Red\\_ciudadana\\_de\\_monitoreo\\_de\\_la\\_calidad\\_del\\_aire\\_de\\_la\\_zona\\_metropolitana\\_del\\_sur\\_de\\_Tamaulipas](https://www.researchgate.net/publication/377756851_Red_ciudadana_de_monitoreo_de_la_calidad_del_aire_de_la_zona_metropolitana_del_sur_de_Tamaulipas)

- Amaechi, P. (2022, diciembre 13). 9 *Environmental Impacts of Cement Production—Environment* Go!  
<https://environmentgo.com/environmental-impacts-of-cement-production/>
- Arif, A., Malik, M. F., Liaqat, S., Aslam, A., Mumtaz, K., Afzal, A., Ch, D. M., Nisa, K., Khurshid, F., & Arif, F. (2020). 3. Water pollution and industries. *Pure and Applied Biology (PAB)*, 9(4), 2214-2224.
- Azamar Alonso, A., & Téllez- Ramírez, I. (2021a). *Las Regiones de Emergencia Ambiental: ¿una alternativa a los extractivismos y a la industrialización salvaje?*  
[https://www.researchgate.net/publication/358132090\\_Las\\_Regiones\\_de\\_Emergencia\\_Ambiental\\_una\\_alternativa\\_a\\_los\\_extractivismos\\_y\\_a\\_la\\_industrializacion\\_salvaje](https://www.researchgate.net/publication/358132090_Las_Regiones_de_Emergencia_Ambiental_una_alternativa_a_los_extractivismos_y_a_la_industrializacion_salvaje)
- Azamar Alonso, A., & Téllez- Ramírez, I. (2021b). *Las Regiones de Emergencia Ambiental: ¿una alternativa a los extractivismos y a la industrialización salvaje?*  
[https://www.researchgate.net/publication/358132090\\_Las\\_Regiones\\_de\\_Emergencia\\_Ambiental\\_una\\_alternativa\\_a\\_los\\_extractivismos\\_y\\_a\\_la\\_industrializacion\\_salvaje](https://www.researchgate.net/publication/358132090_Las_Regiones_de_Emergencia_Ambiental_una_alternativa_a_los_extractivismos_y_a_la_industrializacion_salvaje)
- Azamar Alonso, A., & Téllez Ramírez, I. (2021). (PDF) Las Regiones de Emergencia Ambiental: ¿una alternativa a los extractivismos y a la industrialización salvaje? En *ResearchGate*.  
[https://www.researchgate.net/publication/358132090\\_Las\\_Regiones\\_de\\_Emergencia\\_Ambiental\\_una\\_alternativa\\_a\\_los\\_extractivismos\\_y\\_a\\_la\\_industrializacion\\_salvaje](https://www.researchgate.net/publication/358132090_Las_Regiones_de_Emergencia_Ambiental_una_alternativa_a_los_extractivismos_y_a_la_industrializacion_salvaje)
- Bárcena, A., Cimoli, M., García-Buchaca, R., & Pérez, R. (2019). Perspectivas del comercio internacional de América Latina y el Caribe. *Santiago (Chile): CEPAL*.
- Barreda Marín, A. (2023). Gestación y definición de las Regiones de Emergencia Sanitaria y Ambiental. En *Ciencia y Humanidades* (Vol. 9, pp. 10-33).
- Barsova, N., Yakimenko, O., Tolpeshta, I., & Motuzova, G. (2019). Current state and dynamics of heavy metal soil pollution in Russian

- Federation—A review. *Environmental Pollution*, 249, 200-207. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.020>
- Becerra Pérez, L. A., Ramos Álvarez, R. A., Becerra Pérez, L. A., & Ramos Álvarez, R. A. (2020). EVALUACIÓN DEL IMPACTO EN LA SALUD POR PARTÍCULAS PM2.5 EN SINALOA, MÉXICO. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 36(2), 249-259. <https://doi.org/10.20937/rica.53463>
- Binns, R. (2023). *Which industries pollute the most? | The Independent*. Independent Advisor. <https://www.independent.co.uk/advisor/solar-panels/most-polluting-industries/>
- Boonupara, T., Udomkun, P., Khan, E., & Kajitvichyanukul, P. (2023). Airborne Pesticides from Agricultural Practices: A Critical Review of Pathways, Influencing Factors, and Human Health Implications. *Toxics*, 11(10), 858. <https://doi.org/10.3390/toxics11100858>
- Bravo Calle, O. E., Osorio Rivera, M. A., & Looor Lalvay, X. A. (2021). La calidad del desarrollo industrial y su impacto en el medio ambiente. *Polo del Conocimiento: Revista científico - profesional*, 6(9), 153-166.
- Byers, E. A., Hall, J. W., & Amezcaga, J. M. (2014). Electricity generation and cooling water use: UK pathways to 2050. *Global Environmental Change*, 25, 16-30. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.01.005>
- Camacho García, M. O., & Flamand, L. (2008). Políticas intergubernamentales para controlar la contaminación del aire en ciudades mexicanas: Una evaluación. *Gestión y política pública*, 17(2), 261-313.
- Candeias, C., Ávila, P., Coelho, P., & Teixeira, J. P. (2018). Mining activities: Health impacts. *Reference module in earth systems and environmental sciences*, 1-21.
- Catalán-Vázquez, M., Riojas-Rodríguez, H., Pelcastre-Villafuerte, B. E., Vega, L. A. de L. S. L., & Baltazar-Reyes, M. C. (2018). “There’s a Lot of Cancer Here...” Environmental Risk Perception and Mortality Among Women Who Live in an Industrial Corridor in Mexico. A Sequential Mixed Study. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(4), 565-581.

- CDC. (2019, mayo 8). *Consecuencias para la salud de la sobreexposición al polvo respirable de carbón y sílice*.  
<https://www.cdc.gov/spanish/niosh/mining/topics/respirable.html>
- Cemex, L. (2023). *Cómo Hacemos Cemento | CEMEX Latam*.  
<https://www.cemexlatam.com/es/soluciones-construccion/portafolio-productos/cemento/como-lo-hacemos>
- Chacón, D., Palacios, R., Correa, C., & Chavanna, M. (2021). *Estudio sobre la Influencia de la Central Termoeléctrica de Tula, Hidalgo, en la calidad del aire regional*. 53.
- Chakraborti, L., & Shimshack, J. P. (2022). Environmental disparities in urban Mexico: Evidence from toxic water pollution. *Resource and Energy Economics*, 67, 101281.  
<https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2021.101281>
- Coll-Hurtado, A., Salazar, M. T. S., & Morales, J. (2001). *La minería en México*. UNAM.  
[https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=mAJqV2eoFhMC&oi=fnd&pg=PA9&dq=importancia+y+ubicacion+de+minas+en+mexico+&ots=60sgUoSU0B&sig=XEXFdOgTi\\_023jFrEP8C7FAZmQE](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=mAJqV2eoFhMC&oi=fnd&pg=PA9&dq=importancia+y+ubicacion+de+minas+en+mexico+&ots=60sgUoSU0B&sig=XEXFdOgTi_023jFrEP8C7FAZmQE)
- Cotler, H., Priego, Á., Rodríguez, C., & Enríquez, C. (2004). Determinación de zonas prioritarias para la eco-rehabilitación de la cuenca Lerma-Chapala. *Gaceta ecológica*, 71, 79-92.
- Critchley, L. (2019, marzo 12). *How are Thermal Power Plants Polluting the Environment?* AZoCleantech.  
<https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=861>
- Cubas Rimachi, G. Y., & Flores Huamán, D. J. (2023). (PDF) CONTAMINACIÓN AMBIENTAL Y SUS EFECTOS EN LA SOCIEDAD. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.26495/rce.v10i1.2461>
- Das, A., Kumar, S., Sharma, P., & Sharma, N. (2023). Environmental Effects of Cement Production: A Review. En A. K. Shukla, B. P. Sharma, A. Arabkoohsar, & P. Kumar (Eds.), *Recent Advances in Mechanical Engineering* (pp. 597-608). Springer Nature.  
[https://doi.org/10.1007/978-981-99-1894-2\\_51](https://doi.org/10.1007/978-981-99-1894-2_51)

- De la Fuente Solís, A. M. (2021). *EVALUACIÓN DE LA PRESENCIA DE CONTAMINANTES AMBIENTALES EN EL RÍO SAN JUAN: CASO DE ESTUDIO REFINERÍA "HÉCTOR R. LARA SOSA"*. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN.
- De la Garza Garza, Ó. J., & Arteaga García, J. C. (2011). *Análisis de la competencia en la industria cementera en México*. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1870-66222011000200004](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-66222011000200004)
- De la Mora De la Mora, G. (2012a). *Instalación de refinerías en la región de Tula en Hidalgo: Análisis desde la modernidad*. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-45572012000200007&script=sci\\_abstract&tlng=pt](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-45572012000200007&script=sci_abstract&tlng=pt)
- De la Mora De la Mora, G. (2012b). Instalación de refinerías en la región de Tula en Hidalgo: Análisis desde la modernidad. *Estudios sociales (Hermosillo, Son.)*, 20(40), 181-210.
- Delgado, C., Bautista, F., Gogichaishvili, A., Cortés, J. L., Quintana, P., Aguilar, D., & Cejudo, R. (2019). IDENTIFICACIÓN DE LAS ZONAS CONTAMINADAS CON METALES PESADOS EN EL POLVO URBANO DE LA CIUDAD DE MÉXICO. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(1), Article 1. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.01.06>
- Dene Consultoria, & SENA. (1999). *GUÍA AMBIENTAL PARA TERMOELÉCTRICAS Y PROCESOS DE COGENERACIÓN PARTE AIRE Y RUIDO*. [https://www1.upme.gov.co/siame/Guiasambientales/Termoelectricas\\_procesos\\_cogeneracion.pdf](https://www1.upme.gov.co/siame/Guiasambientales/Termoelectricas_procesos_cogeneracion.pdf)
- Dickinson, R. R. (1986). Fuel Oil. *Energy Exploration & Exploitation*, 4(2-3), 125-134. <https://doi.org/10.1177/014459878600400204>
- DOF. (2011). *NORMA Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-2011, Contaminación atmosférica-Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición*. <https://dof.gob.mx/normasOficiales/4632/semarnat/semarnat.htm>

- DOF. (2014). *DOF - Diario Oficial de la Federación*.  
[https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5357042&fecha=20/08/2014#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5357042&fecha=20/08/2014#gsc.tab=0)
- DOF. (2021). *DOF - Diario Oficial de la Federación*.  
[https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5633855&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5633855&fecha=27/10/2021#gsc.tab=0)
- Dubey, A. (2013). Studies on the Air Pollution Around Cement and Lime Factories. *Journal of Environment and Earth Science*, 3(9), 191.
- El Ghazi, I., Berni, I., Menouni, A., Amane, M., Kestemont, M.-P., & El Jaafari, S. (2020). Etude de la relation entre l'exposition à la pollution atmosphérique liée au trafic routier et l'incidence des pathologies respiratoires au niveau de la ville de Meknès, Maroc. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 31(3), 428-443.
- Elizondo-Pacheco, A., González-Acevedo, Z. I., & Ibarra-Ortega, H. E. (2024). *Lanthanum anomaly as monitor of the burning of fossil fuels pollution in surface soil 2 surrounding the industrial complex in Tula (Mexico City megalopolis)*. [https://www.researchgate.net/profile/Alejandro-Rodriguez-Trejo/publication/382834383\\_Lanthanum\\_Anomaly\\_as\\_Monitor\\_of\\_the\\_Burning\\_of\\_Fossil\\_Fuels\\_Pollution\\_in\\_Surface\\_Soil\\_Surrounding\\_the\\_Industrial\\_Complex\\_in\\_Tula\\_Mexico\\_City\\_Megalopolis/links/66b1011e299c327096b374a4/Lanthanum-Anomaly-as-Monitor-of-the-Burning-of-Fossil-Fuels-Pollution-in-Surface-Soil-Surrounding-the-Industrial-Complex-in-Tula-Mexico-City-Megalopolis.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Alejandro-Rodriguez-Trejo/publication/382834383_Lanthanum_Anomaly_as_Monitor_of_the_Burning_of_Fossil_Fuels_Pollution_in_Surface_Soil_Surrounding_the_Industrial_Complex_in_Tula_Mexico_City_Megalopolis/links/66b1011e299c327096b374a4/Lanthanum-Anomaly-as-Monitor-of-the-Burning-of-Fossil-Fuels-Pollution-in-Surface-Soil-Surrounding-the-Industrial-Complex-in-Tula-Mexico-City-Megalopolis.pdf)
- Estrada-Rivera, A., Díaz Fonseca, A., Treviño Mora, S., García Suastegui, W. A., Chávez Bravo, E., Castelán Vega, R., Morán Perales, J. L., & Handal-Silva, A. (2022). The Impact of Urbanization on Water Quality: Case Study on the Alto Atoyac Basin in Puebla, Mexico. *Sustainability*, 14(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/su14020667>
- Euroinnova. (2021). *¿Qué es la industria?* | Euroinnova. Euroinnova. <https://www.euroinnova.com/blog/que-es-la-industria>
- European environment agency. (2020). *The challenge of reducing industrial pollution—European Environment Agency*.

- <https://www.eea.europa.eu/signals-archived/signals-2020/articles/the-challenge-of-reducing-industrial-pollution>
- Fernández, J. H., Guerra, Y., & Cano, H. (2022). Detection of Bisphenol A and Four Analogues in Atmospheric Emissions in Petrochemical Complexes Producing Polypropylene in South America. *Molecules*, 27(15), Article 15. <https://doi.org/10.3390/molecules27154832>
- Foro Nuclear. (2020). *¿Qué es una central termoeléctrica?* Foro Nuclear. <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-distintas-fuentes-de-energia/que-es-una-central-termoelectrica/>
- Gangadhar, Z. S. (2014). Environmental impact assessment on soil pollution issue about human health. *International Research Journal of Environment Sciences*, 3(11), 78-81.
- Gobierno de México. (2016a). *Petroquímica*. Petroquímica. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/6970/Petroquimica\\_final.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/6970/Petroquimica_final.pdf)
- Gobierno de México. (2016b). *Refinación*. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/6977/Refinacion\\_Web.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/6977/Refinacion_Web.pdf)
- Gobierno de México. (2021). *Puerto de Coatzacoalcos*. [https://www.puertocoatzacoalcos.com.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=41:influencia&catid=33:zona-de-influencia&Itemid=108](https://www.puertocoatzacoalcos.com.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=41:influencia&catid=33:zona-de-influencia&Itemid=108)
- Gobierno del Estado de México. (2021). *Contaminación del Medio Ambiente | Portal Ciudadano del Gobierno del Estado de México*. [https://edomex.gob.mx/medio\\_ambiente\\_2021](https://edomex.gob.mx/medio_ambiente_2021)
- González Flores, C. (2015). *Defensa de los recursos territoriales y movimientos sociales por afectaciones de la industria cementera. Caso de estudio: Atotonilco de Tula, Hidalgo y Apaxco, Estado de México*. <https://core.ac.uk/download/pdf/188014243.pdf>
- González Valencia, M. (2017). *Blog: Río Santiago, una catástrofe ambiental según el Informe del Grupo de Trabajo sobre Empresas y Derechos Humanos de la ONU*. Business & Human Rights Resource Centre.

<https://www.business-humanrights.org/es/blog/blog-r%C3%ADo-santiago-una-cat%C3%A1strofe-ambiental-seg%C3%BAAn-el-informe-del-grupo-de-trabajo-sobre-empresas-y-derechos-humanos-de-la-onu/>

Govender, P., & Sivakumar, V. (2020). Application of k means and hierarchical clustering techniques for analysis of air pollution: A review (1980–2019). *Atmospheric Pollution Research*, 11(1), 40-56. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.09.009>

Greenpeace México. (2025, marzo 14). *Señala Greenpeace México a la Termoeléctrica de Tula por su exceso de contaminación*. Greenpeace México. <https://www.greenpeace.org/mexico/noticia/9978/senala-greenpeace-mexico-a-la-termoelectrica-de-tula-por-su-exceso-de-contaminacion/>

Hernández Garrido, S. (2012). *Diseño de un Purificador de Aire, Para la Reducción de Contaminación Ambiental en Interiores* [Hesis, Instituto Politécnico Nacional]. <https://fisicaparaelectronica.wordpress.com/wp-content/uploads/2018/07/disec3b1o-de-un-purificador-de-aire-para-la-reduccion3b3n-de-contaminacion3b3n-ambiental.pdf>

Hernández Arellano, M. (2020). *Percepción social del riesgo por contaminación ambiental a causa de las cementeras y caleras, en Atotonilco de Tula, Hidalgo y Apaxco, Estado de México*. <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/109418>

Hernández González, I. D. (2017). Determinantes de la concentración industrial en México. *The Anáhuac journal*, 17(1), 33-67. <https://doi.org/10.36105/theanahuacjour.2017v17n1.02>

Hernandez-Flores, M. de la L., Nieto-Pérez, I., Osorno-Baños, E., Galeana-Pizaña, J. M., Otazo-Sánchez, E. M., & Gonzalez-Reyes, J. R. (2024). *Socio-Environmental Vulnerability Assessment in a Multi-Source Polluted Region: A Case Study of Mezquital Valley, Central Mexico*. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4986519/v1>

- Herrera Herbert, J. (2017). *Introducción a la Minería. (2 ed.) Vol. I: Conceptos, tecnologías y procesos.* | Archivo Digital UPM. <https://doi.org/10.20868/UPM.book.63396>
- Herrera, J., Rojas, J. F., Martínez, M., Avard, G., De Moore, M., Sáenz, W., Beita, V. H., Rodríguez, A., & Agüero, A. (2014). *Comparación de la composición química de partículas PM10 y PM2, 5 colectadas en ambientes urbanos y zonas volcánicas del área metropolitana de Costa Rica.* <https://repositorio.una.ac.cr/items/c38244b9-d3e1-497b-969e-0dc10f0187df>
- Holcim, E. (2024). *Guía de Cemento en Construcción: Tipos, Beneficios y Usos Claves.* <https://www.holcim.es/guia-de-cemento-en-construccion-tipos-beneficios-y-usos-claves>
- Horiba. (s. f.). *Refinería de petróleo | Mejora de la eficiencia y la gestión de procesos.* Recuperado 7 de octubre de 2025, de <https://www.horiba.com/esp/process-and-environmental/industries/oil-refinery/>
- Iberdrola. (2020). *La contaminación del suelo, sus efectos sobre nuestro futuro y qué podemos hacer para reducirla.* Iberdrola. [https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/contaminacion-del-suelo-causas-efectos-soluciones?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/contaminacion-del-suelo-causas-efectos-soluciones?utm_source=chatgpt.com)
- Iberdrola. (2025). *La contaminación del agua: Cómo no poner en peligro nuestra fuente de vida.* Iberdrola. <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/contaminacion-del-agua>
- INEGI. (1992). *Síntesis geográfica del estado de Hidalgo.*
- Inegi. (2015). *Censos Económicos 2014. Micro, pequeña, mediana y gran empresa. Estratificación de los establecimientos.*
- Instituto Geográfico Nacional. (2017). *Distribución espacial de la industria.* [https://educativo.ign.es/atlas-didactico/actividades-industriales-eso/distribucion\\_espacial\\_de\\_la\\_industria.html](https://educativo.ign.es/atlas-didactico/actividades-industriales-eso/distribucion_espacial_de_la_industria.html)
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2018). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero.* gov.mx. <http://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>

- Jaziri, N., Boughamoura, A., Müller, J., Mezghani, B., Tounsi, F., & Ismail, M. (2020). A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications. *Energy Reports*, 6, 264-287. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.12.011>
- Jiménez Toro, I. D. (2021). Producción espacial y transformación del paisaje de Minatitlán, Veracruz, 1906-1930. *Signos históricos*, 23(45), 316-349.
- Jobson, B. T., Berkowitz, C. M., Kuster, W. C., Goldan, P. D., Williams, E. J., Fesenfeld, F. C., Apel, E. C., Karl, T., Lonneman, W. A., & Riemer, D. (2004). Hydrocarbon source signatures in Houston, Texas: Influence of the petrochemical industry. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D24), 2004JD004887. <https://doi.org/10.1029/2004JD004887>
- Kampa, M., & Castanas, E. (2008). Human health effects of air pollution. *Environmental Pollution*, 151(2), 362-367. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.012>
- Kashiwada, S. (2020). Environmental Deterioration and Sustainable Development. En W. Leal Filho, A. M. Azul, L. Brandli, A. Lange Salvia, & T. Wall (Eds.), *Life on Land* (pp. 1-13). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-71065-5\\_63-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-71065-5_63-1)
- Kudtarkar, S. (2018). *Indian Cement Industry on Path of Environment Sustainability through Innovation and Resource Optimization*. VII.
- Laub Benavides, A., & Pomatailla Gálvez, F. (2024). ¿Por qué debe desarrollarse la Petroquímica en el Perú? ¿Es suficiente la política de incentivos dictada por el Estado para su implementación? <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/derechoadministrativo/article/download/13528/14154>
- Leal, A. R., Husted, B. W., & Flores Segovia, M. A. (2021). Environmental performance spillovers among Mexican industrial facilities: The case of greenhouse gases. *Journal of Business Research*, 135, 711-720. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.07.004>
- Lezana, E. (2016). Construcción Social De Ciudades No Sustentables: El Caso De El Salto, Jalisco. Urban Water Cycle And Essential Public Services, 3, 17-36. *Revivamos El Río Santiago*.

- [https://riosantiago.jalisco.gob.mx/documentos\\_base/causas-socio-economicas-de-la-contaminacion/lezama-e-c-2016-construccion-social-de-ciudades-no-sustentables-el-caso-de-el-salto-jalisco-urban-water-cycle-and-essential-public-services-3-17-36/](https://riosantiago.jalisco.gob.mx/documentos_base/causas-socio-economicas-de-la-contaminacion/lezama-e-c-2016-construccion-social-de-ciudades-no-sustentables-el-caso-de-el-salto-jalisco-urban-water-cycle-and-essential-public-services-3-17-36/)
- Li, T., Liu, Y., Lin, S., Liu, Y., & Xie, Y. (2019). Soil Pollution Management in China: A Brief Introduction. *Sustainability*, 11(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/su11030556>
- Lin, B., & Zhang, Z. (2016). Carbon emissions in China's cement industry: A sector and policy analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 1387-1394. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.348>
- Liu, L., Hejazi, M., Li, H., Forman, B., & Zhang, X. (2017). Vulnerability of US thermoelectric power generation to climate change when incorporating state-level environmental regulations. *Nature Energy*, 2(8), 1-5. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.109>
- Liu, Y., Lu, S., Yan, X., Gao, S., Cui, X., & Cui, Z. (2020). Life cycle assessment of petroleum refining process: A case study in China. *Journal of Cleaner Production*, 256, 120422. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120422>
- López-Fabila, A. (2020). Agroextractivismo y racismo ambiental: La industria porcícola en el estado de Yucatán. *Geopauta*, 4(4), 93-112. <https://doi.org/10.22481/rg.v4i4.7718>
- Mahasenan, N., Smith, S., & Humphreys, K. (2003). - The Cement Industry and Global Climate Change: Current and Potential Future Cement Industry CO<sub>2</sub> Emissions. En J. Gale & Y. Kaya (Eds.), *Greenhouse Gas Control Technologies—6th International Conference* (pp. 995-1000). Pergamon. <https://doi.org/10.1016/B978-008044276-1/50157-4>
- Mandeep, Gupta, G. K., Liu, H., & Shukla, P. (2019). Pulp and paper industry-based pollutants, their health hazards and environmental risks. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 12, 48-56.
- Martínez Aguilar, E. F. (En prensa). *Diagrama Proceso Del Papel | PDF | Papel de pulpa | Papel*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/453421410/DIAGRAMA-PROCESO-DEL-PAPEL-docx>

- Martínez Laguna, N. (2001). Evolución y expresión territorial de la industria petroquímica en México. *Investigaciones geográficas*, 46, 98-116.
- Martínez-Laguna, N., Sánchez-Salazar, M. T., & Casado Izquierdo, J. M. (2002). [Http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S0188-46112002000300008&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0188-46112002000300008&lng=es&nrm=iso&tlng=es). *Investigaciones geográficas*, 49, 118-135.
- Mazadiego Martínez, L. F., & Puche Riart, O. (2006). Caleras de Nuevo Baztán (Madrid). En *Caleras de Nuevo Baztán (Madrid) | En: Patrimonio geológico y minero: Su caracterización y puesta en valor | pag. 353-360 | Instituto Geológico y Minero de España | 2006 (No. 6; Número 6, pp. 353-360). E.T.S.I. Minas (UPM)*. <https://oa.upm.es/10182/>
- McCulligh Deblasi, C. C. (2017). *Alcantarilla del progreso: Industria y Estado en la contaminación del río Santiago en Jalisco*.
- Melià Seguí, J., & Tuset Peiró, P. (2018). *Introducción a la Industria 4.0*. [https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/141046/38/PLA1\\_Introducción%20a%20la%20industria%204.0.pdf](https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/141046/38/PLA1_Introducción%20a%20la%20industria%204.0.pdf)
- Mensah, A. K., Mahiri, I. O., Owusu, O., Mireku, O. D., Wireko, I., & Kissi, E. A. (2015). Environmental impacts of mining: A study of mining communities in Ghana. *Applied Ecology and Environmental Sciences*, 3(3), 81-94.
- Mgonja, C. (2017). *A Review on Effects of Hazards in Foundries to Workers and Environment*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24642.27847>
- Molina, C. M. (2010). La ruta de México hacia una economía sustentable de baja intensidad de carbono. *Centro Mario Molina, Ciudad de México*.
- Montero, L., & García, J. (2017). Panorama multidimensional del desarrollo urbano. *Comisión Económica para América Latina y el Caribe. CEPAL*, 1-113.
- Moretti, L., Mascio, P. D., & Bellagamba, S. (2017). *Environmental, Human Health and Socio-Economic Effects of Cement Powders: The Multicriteria Analysis as Decisional Methodology*. <https://www.mdpi.com/1660-4601/14/6/645>

- Munsif, R., Zubair, M., Aziz, A., & Zafar, M. (2021). *Industrial Air Emission Pollution: Potential Sources and Sustainable Mitigation*.  
<https://doi.org/10.5772/intechopen.93104>
- Natgeo. (2022, septiembre 7). *Cuáles son los principales contaminantes del aire y cómo podemos contribuir a reducirlos*. National Geographic.  
<https://www.nationalgeographic.com/medio-ambiente/2022/09/cuales-son-los-principales-contaminantes-del-aire-y-como-podemos-contribuir-a-reducirlos>
- National Institute of Environmental Health Sciences. (2023). *La Contaminación del Aire y Su Salud*.  
<https://www.niehs.nih.gov/health/topics/enfermedades/contaminacion>
- Naturaleza. (2020, julio 28). What is Environmental Deterioration, Causes and Consequences? *Postposmo*.  
<https://www.postposmo.com/en/consequences-of-environmental-deterioration/>
- Nieto, H., & Mazzáfero, V. (1999). Salud laboral. *Mazzáfero et al. Medicina y salud pública Buenos Aires: Eudeba*.  
[https://www.academia.edu/download/48424373/salud\\_laboral1.pdf](https://www.academia.edu/download/48424373/salud_laboral1.pdf)
- Ogele, E. P., & Egobueze, A. (2020). The artisanal refining and socioeconomic development in Rivers State, Nigeria, 2007-2017. *International Journal of Research and Innovation in Social Science*, 4(4), 16-25.
- Ogura, T., Ramírez-Ortiz, J., Arroyo-Villaseñor, Z. M., Hernández Martínez, S., Palafox-Hernández, J. P., García de Alba, L. H., & Fernando, Q. (2003). Zacatecas (Mexico) Companies Extract Hg from Surface Soil Contaminated by Ancient Mining Industries. *Water, Air, and Soil Pollution*, 148(1), 167-177.  
<https://doi.org/10.1023/A:1025497726115>
- Oláh, J., Aburumman, N., Popp, J., Khan, M. A., Haddad, H., & Kitukutha, N. (2020). Impact of Industry 4.0 on Environmental Sustainability. *Sustainability*, 12(11), Article 11.  
<https://doi.org/10.3390/su12114674>

- Olayinka, O., Olasumbo, Hakeem, O., Oresanya, O., Juwon, Thompson, A., & Francisca, O. (2019). Environmental and Health Impact of Cement Factory Production in Ibese, Ogun state, Nigeria. *Applied Environmental Research*, 38, 93-110. <https://doi.org/10.35762/AER.2016.38.2.8>
- OMS. (2016). *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*. <https://fctc.who.int/resources/publications/i/item/9789241511353>
- OMS. (2018a). *Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado Sin embargo, cada vez hay más países que toman medidas*. <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>
- OMS. (2018b). *Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado Sin embargo, cada vez hay más países que toman medidas*. <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>
- OMS. (2021a). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire*. <https://www.who.int/es/news-room/questions-and-answers/item/who-global-air-quality-guidelines>
- OMS. (2021b). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire*. <https://www.who.int/es/news-room/questions-and-answers/item/who-global-air-quality-guidelines>
- OMS. (2021c). *Las nuevas Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire tienen como objetivo evitar millones de muertes debidas a la contaminación del aire*. <https://www.who.int/es/news/item/22-09-2021-new-who-global-air-quality-guidelines-aim-to-save-millions-of-lives-from-air-pollution>
- OMS. (2022). *Calidad del aire ambiente (exterior) y salud*. Organización Mundial de la Salud. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- OMS. (2024). *Types of pollutants*. <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts/types-of-pollutants>

- OMS. (2025). *Types of pollutants*. <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts/types-of-pollutants>
- Ordoñez-Sierra, R., Domínguez-Cortinas, G., Hernández-Paniagua, I. Y., Expósito-Castillo, J. L., Gómez-Albores, M. A., Rodríguez-Reyes, M. G., Carrasco-Gallegos, B. V., & Manzano-Solís, L. R. (2024). Regionalization of the Mortality Risk from Cardiomyopathy and Respiratory Diseases Based on the Maximum Entropy Model. *Global Health, Epidemiology and Genomics*, 2024(1), 6103589. <https://doi.org/10.1155/2024/6103589>
- Orpella, X., Ramírez, L., & Schlaghecke, J. (2007). Enfermedades relacionadas con el asbesto. *FMC-Formación Médica Continuada en Atención Primaria*, 14(10), 610-616.
- Palacios Sánchez, J. E., Mejía Saenz, E., Oropeza Mota, J. L., Martínez Menes, M. R., & Figueroa Sandoval, B. (2009). Impacto de las actividades económicas en los recursos suelo y vegetación. *Terra Latinoamericana*, 27(3), 247-255.
- Park, C.-L., Kim, B.-G., & Yu, Y. (2012a). The regeneration of waste foundry sand and residue stabilization using coal refuse. *Journal of Hazardous Materials*, 203-204, 176-182. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.11.100>
- Park, C.-L., Kim, B.-G., & Yu, Y. (2012b). The regeneration of waste foundry sand and residue stabilization using coal refuse. *Journal of Hazardous Materials*, 203-204, 176-182. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.11.100>
- Pemex. (2023). *La Refinería Minatitlán fue la primera en instalarse en el país hace 117 años.* PEMEX. [https://www.pemex.com/saladeprensa/boletines\\_regionales/Paginas/2023-008\\_coatzacoalcos.aspx](https://www.pemex.com/saladeprensa/boletines_regionales/Paginas/2023-008_coatzacoalcos.aspx)
- Pérez Ramírez, N. G. (2010). *Evaluación de la calidad ambiental en la región de la comarca minera barranca de Metztlán, mediante la técnica ERFCA*. <http://200.57.56.70:8080/xmlui/handle/231104/4389>

- Perles, P. (2003). *Hormigón armado*. Nobuko. [https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=4fLpxffkb90C&oi=fnd&pg=PA5&dq=que+es+el+hormig%C3%B3n&ots=iBeFnbhzIK&sig=p9Gufj3aCS9pD\\_slrdIAIDWPJeU](https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=4fLpxffkb90C&oi=fnd&pg=PA5&dq=que+es+el+hormig%C3%B3n&ots=iBeFnbhzIK&sig=p9Gufj3aCS9pD_slrdIAIDWPJeU)
- Pierard, E., Narváez, A., & Valenzuela, J. M. (2019). Refinerías y cambio climático. *Nexos: Sociedad, Ciencia, Literatura*, 41(498), 52-57.
- PNUMA. (2019). *Air Pollution in Asia and the Pacific: Science-based solutions | UNEP - UN Environment Programme*. <https://www.unep.org/resources/assessment/air-pollution-asia-and-pacific-science-based-solutions>
- Portillo, G. (2021, enero 19). Energía termoeléctrica: Características, ventajas y desventajas. *Renovables Verdes*. <https://www.renovablesverdes.com/energia-termoelectrica/>
- Quiñones, M. P. R., & González, L. F. V. (2019). *Descripción del comportamiento del contaminante PM2.5 durante las jornadas del día sin carro entre los años 2013 y 2019 en Bogotá* [PhD Thesis, Universidad El Bosque (Colombia)]. <https://search.proquest.com/openview/4f04e6edc4450506c72308202f66b9a9/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>
- Quiroga Martínez, R. (2007). *Indicadores ambientales y de desarrollo sostenible: Avances y perspectivas para América Latina y el Caribe*. Naciones Unidas Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). <https://ideas.repec.org/p/ecr/col038/5498.html>
- Radonjič, G., & Tominc, P. (2007). The role of environmental management system on introduction of new technologies in the metal and chemical/paper/plastics industries. *Journal of Cleaner Production*, 15(15), 1482-1493. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.03.010>
- Ragothaman, A., & Anderson, W. A. (2017). Air Quality Impacts of Petroleum Refining and Petrochemical Industries. *Environments*, 4(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/environments4030066>
- Rajput, R. S., Pandey, S., & Bhadauria, S. (2017). Status of water pollution in relation to industrialization in Rajasthan. *Reviews on Environmental Health*, 32(3), 245-252. <https://doi.org/10.1515/reveh-2016-0069>

- Ramaswamy, K., Sakthivel, M., & Devadassan, S. R. (2012). Performance Efficiency of Wet scrubber In Induction Furnace Towards Green Revolution-A case study in Indian foundry. *Journal of Environmental Research and Development*, 6, 824-833.
- Rangel, J. F. R., Vargas, O. V., & Gómez, J. Z. (2021). Aplicación del modelo de dispersión gaussiano para estimar la distribución de contaminantes atmosféricos generados por fuentes antropogénicas fijas ubicadas en el sector industrial de puerto interior, Silao, Guanajuato y proponer medidas de control. *Jóvenes en la Ciencia: XXVI Verano de la Ciencia. Vol. 10(2021)*. <http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/6175>
- Razo, I., Carrizales, L., Castro, J., Díaz-Barriga, F., & Monroy, M. (2004). Arsenic and Heavy Metal Pollution of Soil, Water and Sediments in a Semi-Arid Climate Mining Area in Mexico. *Water, Air, and Soil Pollution*, 152(1), 129-152. <https://doi.org/10.1023/B:WATE.0000015350.14520.c1>
- Reyes Medina, R. M. (2021). *DETERMINACIÓN DE COMPUESTOS DERIVADOS DEL PETRÓLEO COMO AGENTES CONTAMINANTES PRESENTES EN EL AGUA SUBTERRÁNEA DE LA CIUDAD INDUSTRIAL DE LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO*. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN.
- Riojas-Rodríguez, H., Schilman, A., López-Carrillo, L., & Finkelman, J. (2013a). La salud ambiental en México: Situación actual y perspectivas futuras. *Salud Pública de México*, 55(6), 638-649.
- Riojas-Rodríguez, H., Schilman, A., López-Carrillo, L., & Finkelman, J. (2013b). La salud ambiental en México: Situación actual y perspectivas futuras. *Salud pública de México*, 55, 638-649.
- Robledo, F. H. (2015). *Riesgos químicos*. Ecoe Ediciones. <https://books.google.com/books?hl=es&lr=&id=2NvDDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT14&dq=En+las+plantas+petroqu%C3%ADmicas+y+qu%C3%ADmicas,+los+empleados+tienen+contacto+con+compuestos+t%C3%B3xicos+como+solventes,+hidrocarburos+y+metales+pesados,+que+pueden+causar+intoxicaciones+agudas+y+enfermedades+cr%C3%B3nicas&ots=fuaWlyGzea&sig=u5D8ETBIEDIY8HIWGSWEPSYIJMM>

- Rocha, S. N. G., Pérez, J. C., & Recio, J. M. B. (2016). Air Quality Trends in Metropolitan Zones in Veracruz, México. *Open Journal of Air Pollution*, 5(2), Article 2. <https://doi.org/10.4236/ojap.2016.52007>
- Romo, D. (2016). REFINACIÓN DE PETRÓLEO EN MÉXICO Y PERSPECTIVA DE LA REFORMA ENERGÉTICA. Romo, Daniel. «REFINACIÓN DE PETRÓLEO EN MÉXICO Y PERSPECTIVA DE LA REFORMA ENERGÉTICA». *Problemas del Desarrollo* 47, n.º 187 (1 de octubre de 2016): 139-64. <https://doi.org/10.1016/j.rpd.2016.10.005>, 47(187), 139-164. <https://doi.org/10.1016/j.rpd.2016.10.005>
- Secretaría de Energía. (2012). *Prospectiva de petrolíferos 2012-2026*. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62955/Prospectiva\\_de\\_Petrol\\_feros\\_2012-2026.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/62955/Prospectiva_de_Petrol_feros_2012-2026.pdf)
- Secretaría de Energía. (2024). *Gas Natural y Petroquímica*. gob.mx. <http://www.gob.mx/sener/es/articulos/gas-natural-y-petroquimica?idiom=es>
- Secretaría de Medio Ambiente del Estado de Nuevo León. (2023). *Plan Integral para la Gestión estratégica de la calidad del aire* (p. 312). [https://aire.nl.gob.mx/docs/reportes/PIGECA\\_2023\\_2033.pdf](https://aire.nl.gob.mx/docs/reportes/PIGECA_2023_2033.pdf)
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2018). *Sistema Nacional de Información Ambiental y de Recursos Naturales*. gob.mx. <http://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/sistema-nacional-de-informacion-ambiental-y-de-recursos-naturales>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2021). *Partículas suspendidas PM10 y PM2.5 dañan salud y medio ambiente*. gob.mx. <http://www.gob.mx/semarnat/articulos/particulas-suspendidas-pm10-y-pm2-5-danan-salud-y-medio-ambiente>
- Secretaría de Relaciones Exteriores. (2023). *Corredor marítimo Coatzacoalcos – Sines*. gob.mx. <http://www.gob.mx/sre/prensa/corredor-maritimo-coatzacoalcos-sines?idiom=es>
- SEGOB, S. (2013). *La energía eólica en México una perspectiva social sobre el valor de la tierra*. Comisión para el dialogo con los pueblos indígenas de México, Secretaría de ....

- Šehić-Mušić, N., Goletić, Š., Pihura, D., Mušić, L., Hasanović, K., & Kalajdzisalihović, A. (2013). *Energy Consumption and Environmental Impact of the Foundry Industry*.  
<https://hemija.pmf.unsa.ba/glasnik/files/Issue%2040/40-8-Sehic-Music.pdf>
- SEMADET, SEMARNAT, & CIGA-UNAM. (2016). *PROGRAMA DE MANEJO INTEGRAL DE LA CUENCA DEL RÍO SANTIAGO - GUADALAJARA*.  
[https://semadet.jalisco.gob.mx/sites/semadet.jalisco.gob.mx/files/resumen\\_ejecutivo\\_vfoola2.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://semadet.jalisco.gob.mx/sites/semadet.jalisco.gob.mx/files/resumen_ejecutivo_vfoola2.pdf?utm_source=chatgpt.com)
- SEMARNAT. (2008). *SEMARNAT*.  
[https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe\\_2008/compendio\\_2008/compendio2008/10.100.8.236\\_8080/ibi\\_apps/WFServlete1ce.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_2008/compendio_2008/compendio2008/10.100.8.236_8080/ibi_apps/WFServlete1ce.html)
- SEMARNAT. (2021). *Compendio 2021*.  
[https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio\\_2021/dgeia\\_wf.semarnat.gob.mx\\_8080/approot/dgeia\\_mce/html/RECUADROS\\_INT\\_GLOS/D2\\_ENERGIA/D2\\_R\\_ENERGIA01\\_01.htm](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2021/dgeia_wf.semarnat.gob.mx_8080/approot/dgeia_mce/html/RECUADROS_INT_GLOS/D2_ENERGIA/D2_R_ENERGIA01_01.htm)
- Servicio Geológico Mexicano. (2017). *Clasificación de yacimientos minerales*.  
[https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones\\_geologicas/Clasificacion-de-yacimientos-minerales.html](https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Clasificacion-de-yacimientos-minerales.html)
- Shen, W., Liu, Y., Yan, B., Wang, J., He, P., Zhou, C., Huo, X., Zhang, W., Xu, G., & Ding, Q. (2017). Cement industry of China: Driving force, environment impact and sustainable development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 618-628.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.033>
- Sosa, B. S., Banda Noriega, R. B., & Guerrero, E. M. (2013). *Industrias de fundición: Aspectos ambientales e indicadores de condición ambiental*.  
<https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/210193>
- Suárez Tamayo, S., & Molina Esquivel, E. (2014). *El desarrollo industrial y su impacto en el medio ambiente*. 52(3), 357-363.
- Swain, C. K. (2024). Environmental pollution indices: A review on concentration of heavy metals in air, water, and soil near

- industrialization and urbanisation. *Discover Environment*, 2(1), 5.  
<https://doi.org/10.1007/s44274-024-00030-8>
- Tapia Martínez, D., Hernández Lara, O. G., & Jon Crane, C. N. (2024). *Conceptualizando lugares de devastación ambiental, hacia una geografía política de “regiones de emergencia sanitaria y ambiental”*.  
<https://rdb.buap.mx/ojs-3311-bajovolcan/index.php/bajovolc/article/view/775>
- Tian, D., Fan, J., Jin, H., Mao, H., Geng, D., Hou, S., Zhang, P., & Zhang, Y. (2020). Characteristic and Spatiotemporal Variation of Air Pollution in Northern China Based on Correlation Analysis and Clustering Analysis of Five Air Pollutants. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(8), e2019JD031931. <https://doi.org/10.1029/2019JD031931>
- US EPA, O. (2015, julio 16). *TRI National Analysis* [Collections and Lists].  
<https://www.epa.gov/trinationalanalysis>
- US EPA, O. (2016a, abril 19). *Particulate Matter (PM) Basics* [Overviews and Factsheets]. <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- US EPA, O. (2016b, abril 26). *Health and Environmental Effects of Particulate Matter (PM)* [Overviews and Factsheets]. <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>
- US EPA, O. (2018a, junio 4). *Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente* [Overviews and Factsheets].  
<https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>
- US EPA, O. (2018b, junio 6). *Cómo puede afectar la salud el humo de los incendios* [Overviews and Factsheets].  
<https://espanol.epa.gov/espanol/como-puede-afectar-la-salud-el-humo-de-los-incendios>
- Vásques, B., & Corrales, S. (2017). La industria del cemento en México. Análisis de sus determinantes. *Problemas del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía*, 48(188), Article 188.  
<https://doi.org/10.1016/j.rpd.2017.01.006>

- Villardón, J. L. V. (2007). Introducción al análisis de clúster. *Departamento de Estadística, Universidad de Salamanca*. 22p.  
<https://www.academia.edu/download/32334872/cluster.pdf>
- von Sperling, E. (2012). Hydropower in Brazil: Overview of Positive and Negative Environmental Aspects. *Energy Procedia*, 18, 110-118.  
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.023>
- Wang, Q., & Yang, Z. (2016). Industrial water pollution, water environment treatment, and health risks in China. *Environmental Pollution*, 218, 358-365. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.07.011>
- WWF. (2025). *Cuando la infraestructura perjudica a la naturaleza y a la gente*. World Wildlife Fund. <https://www.worldwildlife.org/descubre-wwf/historias/cuando-la-infraestructura-perjudica-a-la-naturaleza-y-a-la-gente>
- Yarto Ramírez, M., Gavilán García, A., & Castro Díaz, J. (2004). *La contaminación por mercurio en México*. 72, 21-34.