



**“DISPERSIÓN DE $PM_{2.5}$ Y PM_{10} EN EL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL
DE ZINACANTEPEC, ESTADO DE MÉXICO”**

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**PRESENTA:
AXEL ALEJANDRO TRINIDAD CARDONA
No. CONTROL:
M24280368**

**DIRECTOR DE TESIS:
DR. FREDY CUELLAR ROBLES**

**CODIRECTORA DE TESIS:
DRA. MARÍA DEL CONSUELO HERNÁNDEZ BERRIEL**



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Instituto Tecnológico de Toluca
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Metepec, Edo. de México, **09/Diciembre/2025**
DEPI-3200-674/2025

AXEL ALEJANDRO TRINIDAD CARDONA
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO
EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PRESENTE

De acuerdo con los Lineamientos para la Operación de los Estudios de Posgrado en el Tecnológico Nacional de México y las disposiciones en este Instituto, habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora realizó con respecto a su Trabajo de Tesis titulado **"DISPERSIÓN DE PM_{2.5} Y PM₁₀ EN EL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL DE ZINACANTEPEC, ESTADO DE MÉXICO"**, la División de Estudios de Posgrado e Investigación de este Instituto, concede la Autorización para que proceda al envío del trabajo final vía correo Institucional.

Sin más por el momento, quedo de usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica

"Educación, integridad y ciencia"


JORGE SÁNCHEZ JAIME
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN



ccp. Archivo
JSJ/mccl



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Av. Tecnológico S/N, Col. Agrícola Bellavista, Metepec, Edo. de México,
C.P. 52149, Tels. Dirección: 7222087205, Conmut.: 7222087200
e-mail: info@toluca.tecnm.mx | tecnm.mx | toluca.tecnm.mx





Metepec, Edo. de México, **11/Febrero/2026**
DEPI-3200-068/2026

DR. JORGE SÁNCHEZ JAIME
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS
DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

P R E S E N T E

Por este medio comunicamos a usted que la comisión Revisora designada para analizar la Tesis denominada **"DISPERSIÓN DE PM_{2.5} Y PM₁₀ EN EL SITIO DE DISPOSICIÓN FINAL DE ZINACANTEPEC, ESTADO DE MÉXICO"**, que como parte de los requisitos para obtener el grado académico de **MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL** presenta el **C. AXEL ALEJANDRO TRINIDAD CARMONA** con número de control **M24280368** para sustentar el acto de Recepción Profesional, ha dictaminado que dicho trabajo reúne las características de contenido y calidad para proceder a la impresión del mismo.

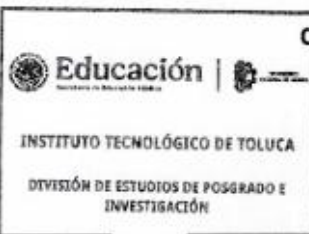
A T E N T A M E N T E


DR. FREDY CUELLAR ROBLES
DIRECTOR DE TESIS


DRA. MARIA DEL CONSUELO HERNANDEZ
BERRIEL
CODIRECTORA DE TESIS


DRA. MARIA DEL CONSUELO MANÓN SALAS
REVISORA DE TESIS


DRA. MARIA DEL CARMEN CARREÑO DE LEÓN
REVISOR DE TESIS



ccp. Archivo
JSJ/mccl



AGRADECIMIENTOS

Con el corazón lleno de gratitud, quiero expresar mi más sincero reconocimiento a quienes han sido parte fundamental de este camino, brindándome su apoyo, amor y sabiduría en cada paso.

A Dios, por su infinita bondad en darme la oportunidad de seguirme preparando, por toda la fortuna que me brinda y por no dejarme sin luz en el camino.

A mi esposa. Patricia Monserrat Bahena, mi eterna compañera, mi agradecimiento por ser mi pilar emocional, por brindarme seguridad y amor incondicional en cada etapa de este proceso. Tu fuerza y tu cariño han sido mi refugio y mi motivación para seguir adelante.

A mi hijo. Alexander Sariel mi mayor tesoro, gracias por ser mi motivación e inspiración diaria. Tu sonrisa y tu pureza me recuerdan cada día por qué vale la pena esforzarme y crecer. Eres la luz que ilumina mi camino.

A mis padres. Lucio Gustavo Trinidad y María Guadalupe Cardona les agradezco profundamente por su amor incondicional, su apoyo invaluable y las enseñanzas que han sido el cimiento de mi formación personal y profesional. Su ejemplo de dedicación y esfuerzo ha sido mi guía y mi inspiración.

A mis hermanos. Paola y Mario les doy las gracias por su compañía constante, sus consejos llenos de sabiduría y los momentos de convivencia que han llenado mi vida de alegría y aprendizaje. Su presencia ha sido un regalo que atesoro profundamente.

A las autoridades del Instituto Tecnológico de Toluca por las facilidades otorgadas para el uso de sus instalaciones y laboratorios.

Al Dr. Fredy Cuellar y la Dra. María del Consuelo Hernández por su apoyo incondicional como asesores, por sus comentarios, confianza y amistad que siempre me proporcionaron.

A los doctores María del Carmen Carreño, Nicolás Flores y María del Consuelo Mañón que participaron en mi desarrollo profesional y personal, por su apoyo y comentarios para la realización de la presente investigación.

A la M. en C. Verónica Albiter y Sonia Martínez, por su apoyo, paciencia y enseñanzas.

Al M. en C. Salvador Flores y la M. en C. Jessica Ivonne Vázquez, por su apoyo y amistad, para que yo pudiera alcanzar este objetivo.

A mis profesores y mentores, mi más profundo agradecimiento por compartir su sabiduría, guiarme con su ejemplo y mostrarme el camino hacia la excelencia. Sus enseñanzas han dejado una huella imborrable en mi vida y en mi formación.

A mis amigos y compañeros de maestría.

Ana Yatzin, Francisco, Diana, Gissel, por su amistad y todos los momentos que pasamos juntos.

Susan y Gisela por su apoyo y amistad.

A la empresa “Mantenimiento y servicios ambientales S.A de C.V” por el apoyo y las facilidades brindadas para la realización en los estudios de campo para el presente trabajo.

Al Laboratorio de Investigación en Ingeniería Ambiental del Instituto Tecnológico de Toluca, por sus instalaciones prestadas a este proyecto.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca de manutención otorgada.

Este logro no sería posible sin cada uno de ustedes. Gracias por creer en mí, por acompañarme y por ser parte de esta historia que hoy celebro con el corazón lleno de gratitud.

RESUMEN

Esta investigación caracterizó la dinámica espaciotemporal y los niveles de concentración de material particulado fino ($PM_{2.5}$) y la fracción respirable (PM_{10}) en el Centro Integral de Residuos (CIR) de Zinacantepec, Estado de México. El estudio se realizó mediante un monitoreo sistemático en nueve puntos estratégicamente distribuidos, empleando un contador de partículas con canales para $PM_{2.5}$ y PM_{10} , el cual se instaló en un radio libre de obstáculos de 10 m y a una altura de 2 m sobre el nivel del suelo, durante julio a septiembre de 2025.

Los resultados indican que las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} superan los límites permisibles establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Secretaría de Salud de México en toda el área del CIR. Se identificó que la concentración de PM_{10} es entre 1.25 y 1.50 veces mayor que la de $PM_{2.5}$, siendo la zona del frente de tiro el foco de mayor contaminación, debido a las actividades de disposición, compactación y cobertura de RSU, además del tránsito vehicular.

Complementariamente, se realizó un análisis de la composición de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU), determinando que los identificados como “varios”, los cuales ya no se pueden revalorizar, tienen una proporción mayor al 50%, mientras que los residuos identificados como “finos”, con un tamaño menor a los 45 μm y con potencial de resuspensión, constituyen el 0.01% del total de RSU recibidos.

La modelación de la dispersión con el software AERMOD View, utilizando datos topográficos y meteorológicos, confirmó que las máximas concentraciones se mantienen dentro del perímetro del CIR, con una dirección de dispersión predominante hacia el norte y noreste. Un análisis geoespacial con QGIS demostró que, si bien no existen áreas naturales protegidas o manchas urbanas dentro de un radio de 1 km, la pluma de dispersión se dirige hacia asentamientos humanos ubicados en esas direcciones. Esto representa un riesgo potencial para la salud pública de los residentes de esa zona, ya que podrían estar expuesta de forma crónica a estos contaminantes y es un riesgo mayor para los grupos vulnerables como niños, adultos mayores y personas con padecimientos preexistentes. Adicionalmente, se identificó que el CIR se ubica sobre corrientes de agua intermitentes, lo que representa un riesgo latente de contaminación hídrica por lixiviados y partículas.

ABSTRACT

This research characterized the spatiotemporal dynamics and concentration levels of fine particulate matter (PM_{2.5}) and the respirable fraction (PM₁₀) at the Comprehensive Waste Center (CIR) in Zinacantepec, State of Mexico. The study was conducted through systematic monitoring at nine strategically distributed points, using a particle counter with channels for PM_{2.5} and PM₁₀, which was installed in an obstacle-free radius of 10 m and at a height of 2 m above ground level, from July to September 2025.

The results indicate that PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations exceed the permissible limits established by the World Health Organization (WHO) and the Mexican Ministry of Health throughout the CIR area. It was identified that the PM₁₀ concentration is 1.25 to 1.50 times higher than that of PM_{2.5}, with the active tipping face being the focal point of highest contamination, due to the disposal, compaction, and covering activities of municipal solid waste (MSW), in addition to vehicular traffic.

Additionally, a compositional analysis of the Municipal Solid Waste (MSW) was carried out, determining that those identified as "miscellaneous," which can no longer be recovered, account for more than 50% of the total, while waste identified as "fines," with a size smaller than 45 µm and resuspension potential, constitute 0.01% of the total MSW received.

Dispersion modeling using AERMOD View software, incorporating topographic and meteorological data, confirmed that the highest concentrations remain within the CIR perimeter, with a predominant dispersion direction toward the north and northeast. A geospatial analysis using QGIS demonstrated that, although there are no protected natural areas or urban settlements within a 1 km radius, the dispersion plume is directed toward human settlements located in those directions. This represents a potential public health risk for residents in that area, as they may be chronically exposed to these pollutants, posing an even greater risk to vulnerable groups such as children, the elderly, and individuals with pre-existing conditions. Additionally, it was identified that the CIR is located on intermittent water streams, representing a latent risk of water contamination due to leachates and particulate matter.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	iv
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT	vii
CONTENIDO	viii
RELACIÓN DE FIGURAS.....	xi
RELACIÓN DE TABLAS	xii
INTRODUCCIÓN.....	1
1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	2
1.1 ANTECEDENTES	2
1.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	5
1.2.1 Atmósfera	5
1.2.2 Contaminación atmosférica	6
1.2.3 Clasificación de contaminantes	7
1.2.4 Material particulado	8
1.2.5 Dispersión de los contaminantes	9
1.2.6 Rosa de los vientos	10
1.2.7 Calidad del aire.....	11
1.2.8 Tipos de muestreador de partículas.....	13
1.2.9 Criterios para la ubicación de equipos	17
1.2.10 Modelos de dispersión.....	18
1.2.11 Modelo de dispersión Gaussiano	18
1.2.12 Modelación de la dispersión	19
1.2.13 Residuos sólidos urbanos.....	22
1.2.14 Disposición final de los residuos	23
1.2.15 Operación de un sitio de disposición final	23

1.2.16	Caracterización fisicoquímica de un relleno	24
1.2.17	Partículas en sitios de disposición final	27
2.	MÉTODO	28
2.1	ÁREA DE ESTUDIO	29
2.2	OPERACIÓN DEL RELLENO SANITARIO	29
2.2.1	Caracterización de residuos sólidos urbanos.....	30
2.2.2	Caracterización de suelo	30
2.3	CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO	31
2.4	MODELO VISUAL DE DISPERSIÓN	33
2.4.1	Definición del área de estudio y fuentes de emisión	33
2.4.2	Meteorología	36
2.4.3	Zona de estudio.....	37
2.4.4	Receptores	37
2.4.5	Modelación	37
2.5	SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.....	38
3.	RESULTADOS	39
3.1	ÁREA DE ESTUDIO	39
3.2	OPERACIÓN DEL RELLENO	42
3.2.1	Caracterización de residuos sólidos urbanos.....	44
3.2.2	Caracterización de suelo	46
3.3	CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO	48
3.4	MODELO VISUAL DE DISPERSIÓN	51
3.4.1	Tasa de emisión de PM _{2.5} y PM ₁₀	52
3.4.2	Meteorología	56
3.4.3	Estructuras fuera del RESA	57
3.4.4	Receptores	59
3.4.5	Resultados del modelo visual de dispersión	59

3.5 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	67
CONCLUSIONES	69
RECOMENDACIONES	70
REFERENCIAS	71
ANEXOS.....	79
ANEXO A. CONSTANTES PARA EL CÁLCULO DE FACTOR DE EMISIÓN	79
ANEXO B. CALENDARIO DE MUESTREO	79

RELACIÓN DE FIGURAS

Figura 1.1 Capas de la atmósfera	6
Figura 1.2 Rosa de vientos realizada con WRPLOT	11
Figura 1.3 Muestreador HI – Vol	14
Figura 1.4 Muestreador MiniVol	16
Figura 1.5 Contador de partículas con canales para partículas y calidad del aire	17
Figura 1.6 Comportamiento típico de una pluma de dispersión Gaussiana	21
Figura 1.7 Método de cuarteo definido en la NMX-AA-015-1985	25
Figura 2.1 Diagrama de bloques del proyecto	25
Figura 2.2 Ubicación de los puntos de muestreo de suelo	31
Figura 2.3 Puntos de monitoreo de $PM_{2.5}$ y PM_{10}	32
Figura 2.4 Punto de referencia con coordenadas de los límites del RESA	33
Figura 3.1 Localización del SDF de Zinacantepec, Estado de México	39
Figura 3.2 Delimitación del SDF de Zinacantepec, Estado de México	40
Figura 3.3 Rosa de los vientos	41
Figura 3.4 Frecuencia de los vientos	42
Figura 3.5 Distribución del RESA de Zinacantepec	43
Figura 3.6 Ubicación de pozos de venteo dentro del RESA	43
Figura 3.7 Porcentaje de humedad y cenizas de RSU y residuos finos	45
Figura 3.8 Tipo de suelo en cada zona muestreada dentro del RESA	47
Figura 3.9 Concentración de $PM_{2.5}$ en cada punto de monitoreo	49
Figura 3.10 Concentración de PM_{10} en cada punto de monitoreo	49
Figura 3.11 Selección de las opciones de dispersión	51
Figura 3.12 Dimensiones del camino	52
Figura 3.13 Datos de entrada de meteorología	57
Figura 3.14 Ubicación de estructuras fuera de la limitación del RESA	58
Figura 3.15 Datos de entrada de los receptores	61
Figura 3.16 Modelado de la concentración de PM_{10} durante 1 h	61
Figura 3.17 Modelado de la concentración de PM_{10} durante 24 h	62
Figura 3.18 Modelado de la concentración de PM_{10} durante 1 año	63
Figura 3.19 Modelado de la concentración de $PM_{2.5}$ durante 1 h	64
Figura 3.20 Modelado de la concentración de $PM_{2.5}$ durante 24 h	65

Figura 3.21 Modelado de la concentración de $PM_{2.5}$ durante 1 año	66
Figura 3.22 Manchas urbanas cerca del RESA de Zinacantepec	67
Figura 3.23 Cuerpos de agua circundantes al RESA de Zinacantepec	68

RELACIÓN DE TABLAS

Tabla 1.1 Interpretación de puntos IMECA	12
Tabla 1.2 Normas de calidad del aire vigentes.....	13
Tabla 2.1 Coordenadas y dimensiones de las fuentes de emisiones de PM	34
Tabla 3.1 Composición física de los RSU	44
Tabla 3.1 Composición física de los RSU (Continuación)	45
Tabla 3.2 Distribución del tamaño de partícula de los residuos finos	46
Tabla 3.3 Medición de PM	50
Tabla 3.4 Tasas de emisión de $PM_{2.5}$ y PM_{10}	56
Tabla 3.5 Coordenadas y dimensiones de estructuras fuera el RESA	58
Tabla 3.6 Estudio de emisiones de PM_{10}	59
Tabla 3.7 Estudio de emisiones de $PM_{2.5}$	60
Tabla A1 Constantes para ecuaciones	79
Tabla A2 Multiplicador de tamaño de partícula	79
Tabla B1 Calendario de visita al relleno sanitario (julio)	79
Tabla B2 Calendario de visita al relleno sanitario (agosto).....	80
Tabla B3 Calendario de visita al relleno sanitario (septiembre).....	80

INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica constituye uno de los mayores desafíos de salud pública global. Entre los contaminantes criterio “aquellos cuyos efectos nocivos sobre el ambiente y la salud humana han sido científicamente demostrados” (Arrieta, 2016) destaca el material particulado (PM, por sus siglas en inglés). Este complejo sistema de partículas sólidas y líquidas en suspensión representa un riesgo particular debido a su capacidad de penetración en el sistema respiratorio: mientras las PM_{10} pueden depositarse en las vías respiratorias superiores, las $PM_{2.5}$ alcanzan la región alveolar (Correa *et al.*, 2023) e incluso pueden translocarse al torrente sanguíneo (Quijano *et al.*, 2015), desencadenando procesos inflamatorios sistémicos.

Paralelamente, la gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) enfrenta una crisis creciente. La generación mundial de RSU (provenientes de hogares, comercios e instituciones) aumentó de 2,010 millones de toneladas en 2016 a una proyección alarmante de 3,400 millones para 2050 (Escamilla *et al.*, 2024). Este incremento exponencial agrava problemas ambientales como la contaminación hídrica, emisiones de gases de efecto invernadero, alteraciones hidrológicas y deterioro de la calidad de vida urbana.

Los rellenos sanitarios (RESA), como obras de infraestructura diseñadas para la disposición final controlada de RSU (DOF, 2004), representan la principal alternativa técnico-administrativa. Sin embargo, su operación genera inevitablemente emisiones de PM mediante múltiples mecanismos: resuspensión de partículas por maquinaria pesada, procesos de compactación, manejo de materiales de cobertura y combustión incompleta de biogás (Abidin *et al.*, 2023; Jawwad *et al.*, 2023). Particularmente preocupante resulta la fracción respirable (PM_{10} y $PM_{2.5}$) que, transportada por factores meteorológicos y topográficos (Chalvatzaki *et al.*, 2010), puede afectar zonas pobladas circundantes.

La evidencia científica señala que la exposición crónica a estas emisiones se asocia con patologías cardiopulmonares y gastrointestinales (Raza *et al.*, 2021), destacando la urgencia de caracterizar sus patrones espacio temporales. Este trabajo de investigación busca cuantificar las emisiones de PM en rellenos sanitarios, evaluar sus mecanismos de dispersión e identificar zonas críticas de exposición, aportando así bases científicas para la formulación de estrategias de protección para la salud pública y ambiente.

1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 ANTECEDENTES

Durante 2025 Ramadan y colaboradores realizaron un análisis de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en el RESA de Jatibarang, para lo cual llevaron a cabo un monitoreo en seis zonas del RESA utilizando un monitor portátil de partículas “Aeroqual $PM_{2.5}/PM_{10}$ ”. Para identificar la concentración y exposición de $PM_{2.5}$ y PM_{10} a distintas distancias, además al aplicar un análisis estadístico determinaron que existen diferencias significativas en las concentraciones promedio de PM, así mismo, realizaron el cálculo de la dosis de deposición respiratoria para afirmar que los adultos eran quienes están más expuestos a las $PM_{2.5}$ y PM_{10} .

En el año 2023, Abidin y colaboradores llevaron a cabo un estudio sobre la exposición de $PM_{2.5}$ a los trabajadores de un tiradero a cielo abierto en Yogyakarta, Indonesia. Se utilizó un muestreador de alto volumen con tiempo de muestreo de 8 horas, donde el filtro para la muestra tenía un tamaño de poro menor a $0.3\ \mu m$ y aplicaron el método gravimétrico para determinar la concentración de PM promedio en el área, la cual fue de $359\ \mu g/m^3$, teniendo una concentración máxima de $1080\ \mu g/m^3$ y una mínima de $87.50\ \mu g/m^3$.

También en el año 2023, Jawwad y colaboradores realizaron un análisis de dispersión y modelado de emisiones atmosféricas en el tiradero a cielo abierto en Klotok, Kediri. El tiradero consta de tres celdas de disposición, dos inactivas y una activa, por lo que midieron la calidad del aire empleando un muestreador High Vol para medir los niveles de partículas, un impinger para medir niveles de gas y un sonómetro para medir los niveles de ruido en esas tres zonas, específicamente en la zona activa de disposición. Midieron dióxido de nitrógeno (NO_2), partículas suspendidas totales (PST), dióxido de azufre (SO_2), ozono (O_3), monóxido de carbono (CO), plomo (Pb), hidrocarburos no metálicos (NMHC), $PM_{2.5}$, PM_{10} y amoníaco (NH_3); y recolectaron datos meteorológicos de la región para modelar la dispersión de dichos contaminantes con el software AERMOD. Encontraron que el contaminante que rebasaba los límites permisibles es el CO, teniendo la mayor concentración en la celda activa debido a la alta operación de equipos pesados y vehículos que están en operación. Con AERMOD determinaron que las emisiones de los contaminantes se dispersan al norte, noreste, este y sur.

Durante el año 2022 Arya y colaboradores realizaron una investigación sobre la distribución de tamaño de partícula generado de la quema de RSU en un Sitio de Disposición Final (SDF) ubicado en la Capital Nacional del Territorio de la India, donde el rango de tamaño seleccionado para el análisis de las partículas es de 0.3 a 10 μm . Las muestras fueron RSU secos y recolectados de tres RESA, los almacenaron en bolsas con cierre hermético y fueron quemados bajo condiciones controladas de laboratorio empleando una cámara de dilución de combustión. Los resultados mostraron que durante la fase de llamas se emite una mayor concentración de partículas con tamaños de 1.0 y 2.5 μm , lo que genera una mala calidad del aire y efectos adversos a la salud del ser humano.

Por otra parte, en el 2021 Raza y colaboradores, analizaron la calidad del aire en dos SDF y dos estaciones de transferencia en la ciudad de Lahore, Pakistán. Llevaron a cabo visitas y mediciones de la calidad del aire en cada sitio, dos en época de lluvia y dos en época de estiaje; además midieron $\text{PM}_{2.5}$ en la fuente de emisión y a 50 m de distancia en la dirección del viento. Los resultados señalan que en época de estiaje hay mayor concentración de $\text{PM}_{2.5}$ en los SDF; y sin importar la época de la medición la concentración a 50 m en la dirección del viento aumenta entre 50 a 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en comparación con la medición de la fuente.

Peter y Nagedra en 2021, llevaron a cabo un estudio en el tiradero a cielo abierto de Perungudi en la ciudad de Chennai donde la composición de RSU es una mezcla de reciclables y orgánicos, además en el tiradero se realizan prácticas de quema de RSU. Por lo que llevaron a cabo un análisis de $\text{PM}_{2.5}$, el muestreo lo realizaron en el techo de un edificio que se encuentra a 600 m del tiradero y los filtros empleados fueron secados antes y después del muestreo. Emplearon el software AERMOD considerando el tiradero como una fuente de área para modelar las emisiones y llevar a cabo el modelo de dispersión con lo que confirmaron que las operaciones en el tiradero deterioran la calidad local del aire y que la quema de RSU contribuye de manera significativa la concentración de $\text{PM}_{2.5}$.

Opara y colaboradores durante 2021, evaluaron los riesgos para la salud debido a la exposición e inhalación a partículas no cancerosas provenientes de los principales tiraderos de la metrópolis de Owerri en Nigeria durante los meses de enero y agosto. Para ello midieron la concentración de partículas en siete tiraderos utilizando un contador de partículas con seis canales para medir tamaño de partícula de 0.3, 0.5, 1.0, 2.5, 5.0 y 10 μm para evaluar los

riesgos para la salud mediante la exposición y respuesta del PM. Los resultados demostraron que los niños eran la población más expuesta al PM debido a que entre semana pasan las tardes fuera de sus casas y los fines de semana aumenta el tiempo que se encuentran fuera, por lo que ese tiempo lo pasan en las inmediaciones de los tiraderos, además afirmaron que los niveles de concentración más altos en todos los tiraderos durante los meses muestreados fueron las $PM_{0.3}$.

En 2014 Rim-Rukeh, llevó a cabo un análisis de la contribución de contaminantes a la atmósfera en cinco sitios no controlados en Nigeria. En los sitios escogidos el incendio de RSU es frecuente. Para el análisis emplearon equipos portátiles de monitoreo de la calidad del aire empleando ocho parámetros (NO_2 , PM_{10} , CO_2 , CO , SO_2 , CH_4 , NH_3 , H_2S). El tipo de incendio observado en todos los sitios fue incendio superficial. Determinaron que el PM en los cinco sitios estaba tres veces por encima del límite reglamentario de $250 \mu g/m^3$ en 24 h lo que genera preocupación en la salud humana.

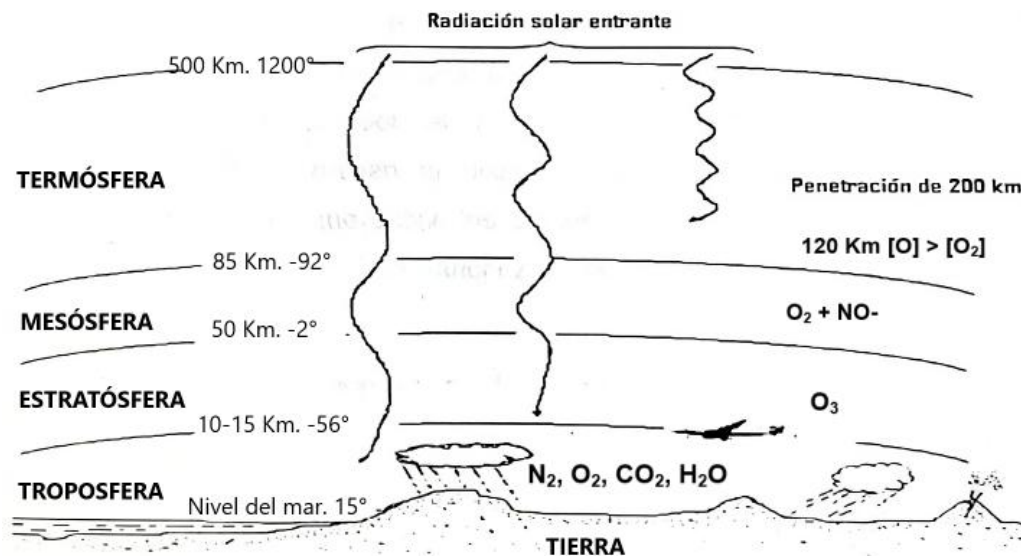
1.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

El presente capítulo establece los fundamentos teóricos para comprender la generación de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en los RESA, proceso que se origina desde la interacción de mecanismos físicos, químicos y biológicos. La descomposición de los RSU, la erosión del suelo y la resuspensión por las actividades realizadas en el RESA son las fuentes principales. El marco teórico integra principios de ingeniería ambiental para modelar el RESA como una fuente fija de emisión.

1.2.1 Atmósfera

El aire es una sustancia muy importante para mantener la vida en la superficie terrestre, ya que proporciona oxígeno para respirar (Jawwad *et al.*, 2023). La palabra atmósfera proviene del griego atmós que significa vapor o neblina y sfaira que quiere decir esfera (Böhme, 2021). Es una capa gaseosa que rodea a la Tierra con una altura mayor a los 100 km y cuya composición química esta mayormente compuesta por dos constituyentes, Nitrógeno (N_2) y Oxígeno (O_2) cuya fracción molar es 78.08 % y 20.95 % respectivamente, otro elemento que se encuentra en mayor abundancia es el Argón (Ar) que tiene un 0.93 %. La atmósfera está constituida por estos tres elementos en un 99.96 % molar, el resto está dividido en vapor de agua (H_2O) con menos de 1 % y el resto son constituyentes que varían dependiendo el espacio y tiempo, dentro de los que se encuentra el helio (He), neón (Ne), criptón (Kr), xenón (Xe) y gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), dióxido de azufre (SO_2), ozono (O_3) y óxidos de nitrógeno (NO, NO_2 , N_2O) (Hoefs y Harmon, 2022).

La atmósfera está dividida en cuatro capas superpuestas; troposfera, estratosfera, mesosfera y termósfera (Figura 1.1). Cada una es caracterizada por sus diferentes comportamientos. La Troposfera cuenta con un grosor promedio de 12 kilómetros y es la capa más estudiada ya que allí es donde viven los seres humanos y donde ocurren los fenómenos meteorológicos que los afectan (Mora *et al.*, 2020; Cuellar, 2011).



Fuente: Adaptado de Cuellar, 2011.

Figura 1.1 Capas de la atmósfera

La contaminación del aire es la presencia de uno o más elementos o sus combinaciones que en ciertas cantidades y con tal duración que afectan la vida humana, animal, de plantas o de infraestructura que interfieran en la calidad de vida o la realización de actividades (Kenneth y Cecil, 1999).

1.2.2 Contaminación atmosférica

Un contaminante atmosférico es cualquier agente físico, químico y biológico que altere las características naturales de la atmósfera (Abidin *et al.*, 2023). Es cualquier gas o partícula que en altas concentraciones puede afectar de manera negativa la salud del ser humano, el ambiente o propiedad (Brusseau *et al.*, 2019). La generación de contaminantes atmosféricos proviene de distintas fuentes, una de éstas es la combustión de combustibles fósiles ya que este proceso se genera dióxido de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COV_s) y PM. Cuando un contaminante es emitido directamente a la atmósfera debido a un proceso se le denomina contaminante primario, en este tipo de contaminantes se encuentra CO o el SO_2 , mientras que los contaminantes secundarios son formados en la atmósfera debido a reacciones fotoquímicas que transforman a los contaminantes primarios, como el ozono (O_3) (Pénard y Annesi, 2004; Holman, 1999).

Durante 2021 la Organización Mundial de la Salud (OMS) estimaba 4.2 millones de muertes cada año alrededor del mundo a causa de la contaminación atmosférica y dentro de los contaminantes con mayor impacto se encuentra el $PM_{2.5}$ y PM_{10} cuya exposición genera enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así mismo el NO_2 provoca la lluvia ácida y resulta nocivo para la salud, agricultura y ganadería (Caporale *et al.*, 2024).

1.2.3 Clasificación de contaminantes

Los contaminantes atmosféricos cuentan con diversas clasificaciones debido a su naturaleza; los contaminantes primarios y secundarios es una clasificación que depende como son emitidos en la atmósfera, los primarios están asociados a procesos de combustión y los secundarios son formados en la atmósfera (Saxena y Sonwani, 2019).

Las fuentes de contribución de contaminantes atmosféricos se clasifican en naturales y antropogénicas. Las fuentes naturales son aquellas donde no se involucra el ser humano y los fenómenos naturales son quienes generan los contaminantes atmosféricos; como las erupciones volcánicas, incendios forestales, dispersión de polen, entre otros. Cuando los contaminantes son generados por emisiones creadas por el hombre son llamadas fuentes antropogénicas; en éstas se incluye la combustión de combustibles fósiles, la quema de basura, procesos llevados a cabo en empresas (Rim-Rukeh, 2014).

Las fuentes antropogénicas a su vez se clasifican en fuentes fijas, de área, puntuales y móviles; las fuentes fijas son cualquier instalación fija y establecida en una región particular que tenga como finalidad desarrollar procesos u operaciones mientras emite contaminantes a la atmósfera; como las fábricas, refinerías, plantas eléctricas, etc. Las fuentes puntuales son fuentes únicas e identificables con coordenadas fijas, cuentan con un diámetro de salida pequeño y se encuentran por encima del nivel del suelo; debido a sus características el término de fuente puntual es empleado para referirse a las chimeneas industriales. Las fuentes de área, como su nombre lo indica se trata de un área donde se agrupan varias fuentes fijas cuyas emisiones en conjunto pueden ser mayores en comparación con las emisiones individuales, por lo que se considera un área geográficamente y las emisiones se representan como un valor combinado. Por último, las fuentes móviles están asociadas con el transporte, ya que son automóviles, trenes, aviones, camiones, entre otros, y en ocasiones una carretera sin pavimentar se puede considerar una fuente móvil ya que genera polvo debido al paso de

un vehículo de motor; es decir, los contaminantes son emitidos a lo largo del camino (Saxena y Sonwani, 2019).

1.2.4 Material particulado

Partícula se refiere a cualquier materia sólida o líquida que se encuentre dispersa y sea arrastrada por el aire, este tipo de moléculas tienen diámetros menos de 500 μm y pueden llegar a medir 0.0002 μm , por lo que pueden permanecer en suspensión unos cuantos segundos o incluso varios meses dependiendo del tamaño de la partícula. Las partículas con un tamaño entre 0.1 y 1 μm tienen velocidades de asentamiento pequeñas comparadas con las velocidades del viento. Las partículas mayores de 1 μm tienen velocidades de asentamiento pequeñas pero significativas, mientras que las partículas con tamaños mayores de 20 μm tienen grandes velocidades de asentamiento y se eliminan del aire por gravedad y otros procesos de inercia (Kenneth y Cecil, 1999).

El PM se define como el conjunto de partículas sólidas y/o líquidas que se encuentran en suspensión en la atmósfera (Quijano y Orozco, 2005). Es un contaminante complejo de composición química y física no específica, pero puede consistir en compuestos de carbón, iones, metales, hidrocarburos, entre otros; sin embargo, la composición puede variar dependiendo del tiempo y de las características de la región (Correa *et al.*, 2023). Es considerado un contaminante criterio, ya que por medio de investigaciones en calidad del aire se ha demostrado que a ciertas concentraciones resulta perjudicial para el ambiente, la salud y el bienestar de la población (Arrieta, 2016). El análisis de PM se basa en el tamaño de partícula; las partículas suspendidas totales (PST) tienen un diámetro de hasta 100 μm , si el diámetro de la partícula es inferior a 10 μm (PM_{10}) son llamadas partículas gruesas o fracción respirable, las partículas con diámetro menor a 2.5 μm ($\text{PM}_{2.5}$) son denominadas partículas finas y las partículas con un diámetro menor a 1 μm (PM_1) se definen como partículas ultrafinas. Las partículas finas y ultrafinas se producen por combustión de combustibles fósiles y presentan una mayor amenaza para la salud que las partículas gruesas, ya que penetran en los alveolos respiratorios (Hamanaka y Mutlu, 2018; Pérez *et al.*, 2010; Polichetti *et al.*, 2009).

1.2.4.1 Afectaciones a la salud

El PM provoca afectaciones a la salud ya que pueden ser inhaladas y llegar a los pulmones provocando daños a la salud, además las partículas finas pueden alcanzar la región alveolar

de los pulmones (Correa *et al.*, 2023). La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC por sus siglas en inglés) ha clasificado a las partículas suspendidas como cancerígenas en el grupo 1 debido a que los metales pesados constituyen una parte importante en la composición de estas partículas (Negral *et al.*, 2020). Los gases procedentes de los vehículos de motor tienen una importante contribución de partículas finas (Fang *et al.*, 2006).

Las PM₁₀ cuando son respiradas pueden penetrar y depositarse en la región traqueo bronquial, mientras que las PM_{2.5} cuando ingresan al cuerpo se depositan en los alveolos pulmonares y pueden llegar al torrente sanguíneo, por lo que su efecto en la salud es mayor (Quijano *et al.*, 2015). Debido a ello el PM es considerado como una causa de cáncer de pulmón y un riesgo por el cual se puede contraer diabetes mellitus tipo 2 (Legarreta *et al.*, 2015). Sin embargo, existe la prueba de que las partículas con diámetros menores a 1 µm son las que más contribuyen a la contaminación en áreas urbanas y son las más dañinas para la salud (Simões *et al.*, 2015).

Las emisiones por PM provenientes de fuentes fijas y móviles propician enfermedades cardiovasculares, respiratorias, cáncer de pulmón, cefaleas y son causantes de millones de muertes prematuras (Ramos y Benítez, 2017).

1.2.5 Dispersión de los contaminantes

La concentración de los contaminantes en la atmósfera es muy variable debido a que depende de diversos factores, como las variables meteorológicas de la región, las condiciones topográficas, la ubicación y altura de las fuentes de emisión de los contaminantes (Mora *et al.*, 2020). La dispersión de los contaminantes sigue las leyes de difusión turbulenta, lo que indica que es influenciada por las tendencias de dirección y velocidad del viento, además de ser verse afectada por el gradiente vertical de temperatura (Giosanu *et al.*, 2021).

Los elementos que conforman el relieve de una región condicionan los vientos dominantes, afectando las corrientes que circulan cerca de la superficie, por lo que la topografía determina la velocidad, dirección y la magnitud que un contaminante tendrá en esa zona geográfica (Arrieta, 2016).

Las variables meteorológicas como la dirección y velocidad del viento, la presión barométrica y la humedad relativa tienen un papel importante al momento de definir el destino y dispersión de los contaminantes en la atmósfera, además se debe considerar la estación cultural del año ya que se ha reportado una mayor concentración de contaminantes atmosféricos en invierno debido a los vientos de baja velocidad (Peter y Nagendra, 2021).

Los fenómenos meteorológicos provocan efectos contrastantes en la contaminación atmosférica de una región, ya que pueden agravar la situación por efecto de la recirculación de las parcelas de aire o pueden reducirla debido a la velocidad del viento. Estos fenómenos se dividen en macroescala (fenómenos meteorológicos de forma radial superior a 1000 km y pueden durar varios días o incluso semanas), mesoescala (fenómenos con un diámetro entre 2 a 1000 km y pueden durar horas o hasta un par de días) y microescala (fenómenos meteorológicos con distancias radiales menores de un metro hasta un par de km, y pueden durar desde unos segundos hasta varios minutos) (Pérez *et al.*, 2020).

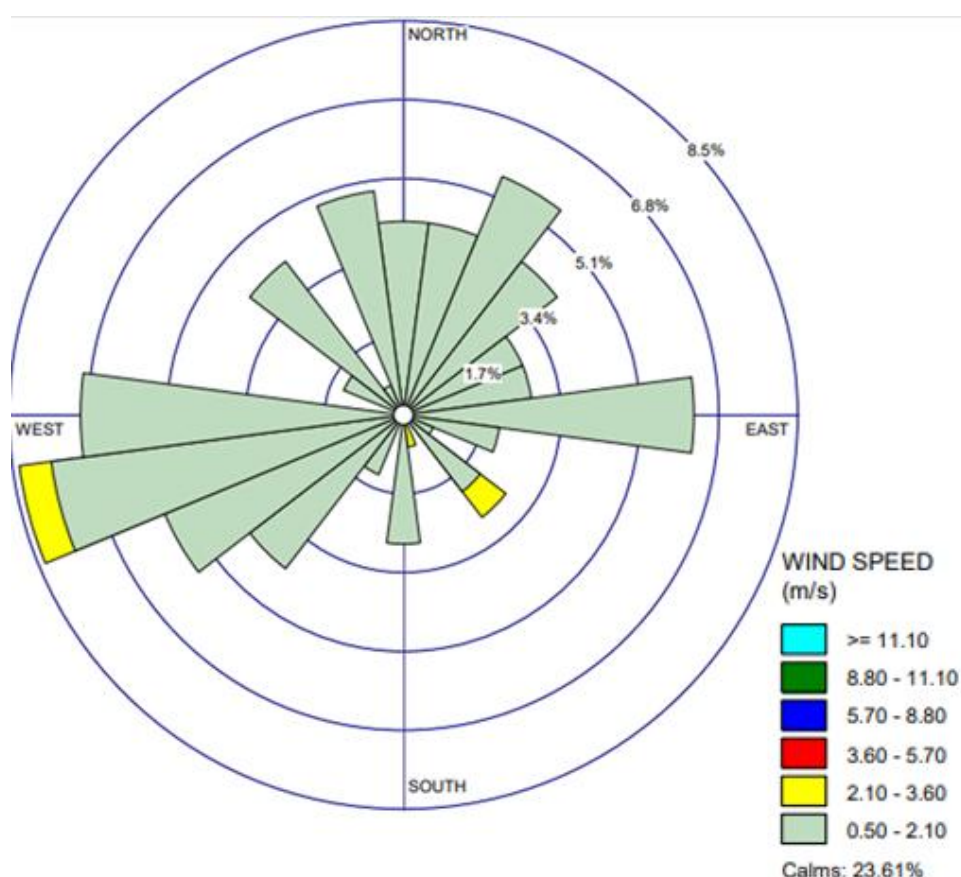
Los equipos especializados no siempre están disponibles para las investigaciones, por lo que, para el análisis de la determinación de concentración de los contaminantes, se emplean los datos provenientes de las estaciones meteorológicas debido a la estrecha relación que existe entre las variables meteorológicas y las partículas (Pérez *et al.*, 2020).

La velocidad y dirección del viento no es constante lo que ocasiona variaciones en el transporte de los contaminantes, provocando que lleguen a áreas circundantes de la fuente o que se mantengan en la misma fuente. Mientras que las variaciones de temperatura influyen el movimiento vertical del aire, si la temperatura de la superficie aumenta debido a la radiación solar en la superficie de la Tierra va a favorecer el aumento de altura de la mezcla y por consiguiente aumenta la dispersión de contaminantes. Por otra parte, la humedad relativa indica eventos de precipitación (Peter y Nagendra, 2021), este parámetro es de importancia ya que la precipitación arrastra la mayor cantidad de contaminantes al suelo disminuyendo niveles de contaminación en el aire (Mora *et al.*, 2020).

1.2.6 Rosa de los vientos

El viento se ve afectado por los fenómenos meteorológicos de macroescala ya que este es el responsable del viento predominante, debido a que es causado por el viento global formado

por los patrones de viento de la Tierra. Los fenómenos de microescala causan un viento específico debido a las condiciones específicas de la zona; además, la topografía afecta la dinámica del viento de manera local. La rosa de los vientos es un diagrama circular concéntrico que ilustra la información de los vientos de una zona determinada, dando los datos de velocidad, dirección y tendencia. Para la generación de las rosas de vientos se puede emplear WRPLOT View, un software gratuito donde solo se requiere registro en internet para poder descargarlo gratuitamente (Sundari *et al.*, 2020), la Figura 1.2 muestra una rosa de vientos realizada con WRPLOT View con datos obtenidos de la estación meteorológica de Zinacantepec.



Fuente: Adecuación WRPLOT

Figura 1.2 Rosa de vientos realizada con WRPLOT

1.2.7 Calidad del aire

El Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA) es un valor de referencia empleado para informar la contaminación atmosférica de una ciudad o región en una hora y fecha

determinada, los datos se actualizan cada hora. La información es recabada por medio del Sistema de Monitoreo Atmosférico, el cual monitorea las concentraciones del aire de seis contaminantes criterio O₃, CO, SO_x, NO_x, Pb (plomo) y PM. La escala IMECA va de 0 a 500, las puntuaciones entre 101 y 150 hacen mención de que la atmósfera no es apta para poblaciones sensibles, como niños pequeños y adultos mayores con enfermedades cardíacas o pulmonares. Puntuaciones con rango entre 151 a 200 indican que el aire es perjudicial para la población en general, mientras que los valores por encima de 200 indican que la población está en riesgo de sufrir efectos adversos para la salud. La Tabla 1.1 muestra la interpretación de los puntos IMECA (Borbet *et al.*, 2018; Trejo, 2006).

Tabla 1.1 Interpretación de puntos IMECA

Puntos imeca	Condición	Efectos a la salud humana
0 – 100	Dentro de la norma. Satisfactoria	Ninguno
101 – 200	No satisfactoria	Molestias en ojos, nariz y garganta en personas sensibles
201 – 300	Mala	Posibles problemas respiratorios por actividad al aire libre
301 – 500	Muy mala	Se agudizan los síntomas anteriores, especialmente en la población sensible

Fuente: Trejo, 2006

Las normas de calidad tienen el objetivo de proteger la salud de la población general y vulnerable (más susceptible a tener afectaciones debido a la concentración de contaminantes en el aire), por ello fijan los valores máximos permisibles de la concentración de estos. Las normas de calidad del aire son publicadas en el Diario Oficial de la Federación por la secretaria de Salud, en la Tabla 1.2 se enlistan las normas de calidad del aire vigentes y los contaminantes a los que se aplica (RAMA, 2024).

La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que durante 2019 el 99 % de la población respiró aire contaminado que supera los límites recomendados e indica que en los países de ingresos medianos y bajos su exposición fue más elevada (OMS, 2024).

Tabla 1.2 Normas de calidad del aire vigentes.

Contaminante	Concentración y tiempo promedio de exposición	Para protección de la salud de la población susceptible
Ozono (O ₃)	0.090 ppm. Promedio de 1 h.	0.065 ppm. Promedio móvil de 8 hrs. tomado como el máximo en un periodo de 1 año.
Monóxido de carbono (CO ₂)	9 ppm. Promedio móvil de 8 h.	1 vez al año.
Partículas suspendidas de fracción respirable PM ₁₀	70 µg/m ³ Promedio de 24 h.	36 µg/m ³ Media aritmética anual.
Partículas suspendidas de fracción respirable PM _{2.5}	41 µg/m ³ Percentil 98 promedio de 24 h.	10 µg/m ³ Media aritmética anual.
Bióxido de azufre (SO ₂)	0.11 ppm. Promedio de 24 h. 1 vez al año.	0.025 ppm. Media aritmética anual.
Bióxido de nitrógeno (NO ₂)	0.106 ppm. Promedio de 1 h.	1 vez al año.

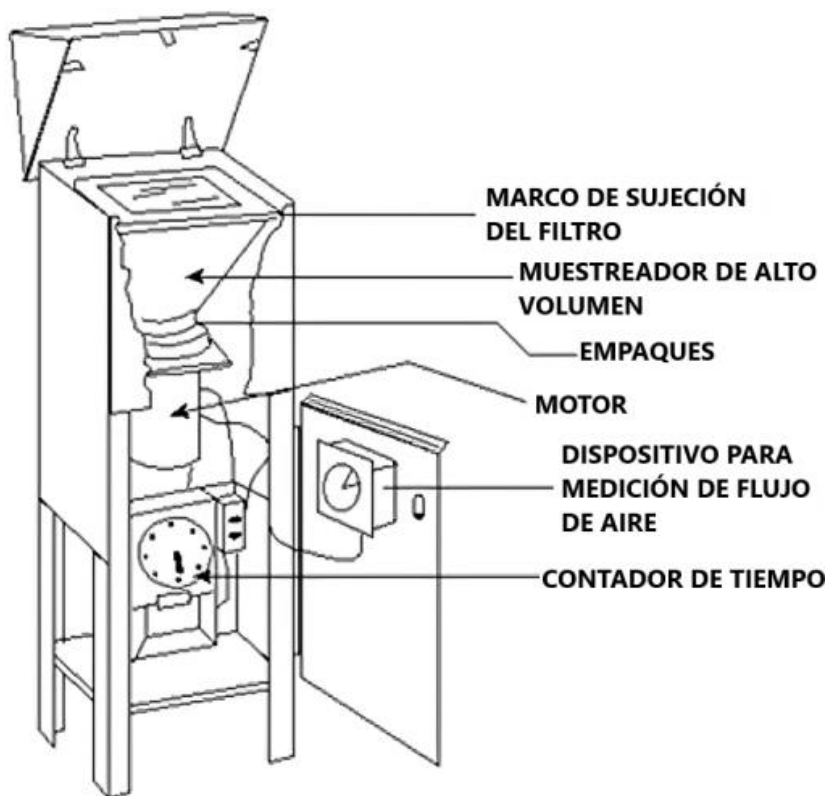
Fuente: RAMA, 2024.

1.2.8 Tipos de muestreador de partículas

Las determinaciones más importantes para el estudio de las partículas son su concentración y tamaño (Simões *et al.*, 2015). Los equipos de muestreo succionan una cantidad cuantificable de aire ambiente hacia una caja de muestreo durante 24 h, se calcula el volumen total de aire muestreado con la velocidad de flujo y el tiempo de muestreo; algunos equipos pueden instalarse directamente sobre las personas para realizar mediciones directas de PM (Arciniégas, 2012). Los muestreadores de partículas HI – Vol y MiniVol son los equipos más empleados en el muestreo de aire, siendo el HI – Vol regulado por un método de referencia, mientras el MiniVol debe ser probado y comparado por un método de referencia para asegurar que no existen diferencias significativas con el muestreo.

1.2.8.1 HI – Vol

La Norma Oficial Mexicana NOM-035-ECOL-1993 establece el método de referencia para el análisis y medición por medio del muestreo de alto volumen (equipo HI – Vol), para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en aire ambiente con un rango de medición de 2 a 750 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para la colecta de partículas con tamaños de 20 a 50 μm se requieren velocidades de viento entre 1.3 y 4.5 m/s dependiendo de la dirección del viento, así mismo el equipo cuenta con una geometría que favorece la recolección de partículas (Figura 1.3).



Fuente: Adecuación de Arciniégas, 2012.

Figura 1.3 Muestreador HI – Vol

El muestreador succiona una cantidad de aire determinada a través de un filtro que maneja una eficiencia de recolección mínima del 99 % para partículas del 0.3 durante un periodo de muestreo de 24 h. Los filtros deben numerarse e inspeccionarse a contraluz para detectar imperfecciones que puedan afectar el resultado del muestreo. El volumen total de aire muestreado se determina a partir del flujo de aire ambiente medido (realizando el ajuste de presión y temperatura empleando las condiciones normales) y del tiempo de muestreo como se observa en la Ecuación 1.1.

$$V_{ptn} = V_M \left(\frac{P_1 - \Delta P}{P_{ptn}} \right) \frac{T_{ptn}}{T_1} \quad (Ec 1.1)$$

Donde:

V_{ptn} = volumen patrón (m^3)

T_{ptn} = temperatura patrón 298 K (25°C)

P_{ptn} = presión patrón 101 KPa (760 mm Hg)

V_M = volumen real medido por el medidor de volumen patrón (m^3)

P_1 = presión barométrica durante la calibración (KPa o mm Hg)

ΔP = caída de presión a la entrada del medidor de volumen (KPa o mm Hg)

T_1 = temperatura ambiente durante la calibración

Para calcular la velocidad de flujo patrón (m^3_{ptn}/min) se aplica la Ecuación 1.2, la cual relaciona el volumen patrón obtenido con el tiempo de muestreo transcurrido.

$$Q_{ptn} = \frac{V_{ptn}}{t} \quad (Ec 1.2)$$

Donde:

Q_{ptn} = velocidad de flujo volumétrico patrón (m^3/min)

V_{ptn} = volumen patrón (m^3)

t = tiempo transcurrido (min)

1.2.8.2 MiniVol

Muestreador portátil desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA por sus siglas en inglés) y la Autoridad Regional de Contaminación del Aire de Lane. Araújo y colaboradores (2014) emplearon un MiniVol TAS fabricado por Airmetrics, el cual toma muestras ambientales con un flujo de 5 L/min para retener de forma selectiva $PM_{2.5}$, PM_{10} y PST; a pesar de no ser un método de referencia brinda resultados que se aproximan mucho a los datos que se obtienen utilizando muestreadores de referencia federales. El MiniVol TAS es ideal para áreas remotas ya que es ligero y portátil. Durante el muestreo de partículas el aire pasa a través de una separación de partículas, la cual se logra por el uso de impactores (están disponibles con un punto de corte de 10 y 2.5 micras) y si el muestreo se aplica sin los impactores permite la

recolección de PST, posterior a los impactores se encuentra un medio filtrante donde la muestra es atrapada. Para un caudal correcto debe realizarse el ajuste de presión y temperatura para cada proyecto de muestreo. En la Figura 1.4 se muestra el muestreador de partículas MiniVol.



Figura 1.4 Muestreador MiniVol

1.2.8.3 Contadores de partículas

Las ventajas más importantes de los contadores de partículas son su bajo costo, facilidad de uso, movilidad y su capacidad de medir concentraciones de partículas en intervalos de tiempo de un segundo. Son empleados para evaluar la concentración de partículas en distintos espacios y tiempos proporcionando buenas aproximaciones de la exposición real (Tittarelli *et al.*, 2008). Los contadores de partículas operan mediante un sistema de canales de detección, cada uno diseñado para medir un rango específico de tamaño de partícula. Estos canales funcionan como intervalos de clasificación, permitiendo la cuantificación diferenciada de partículas según su diámetro aerodinámico. Por ejemplo, un contador puede tener canales configurados para PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_{10} y partículas mayores, lo que facilita el análisis granulométrico y la caracterización de la distribución de tamaños en una muestra. En la Figura 1.5 se muestra un contador de partículas con canales de detección para la temperatura, humedad relativa, concentración de aldehídos, compuestos orgánicos volátiles, $PM_{2.5}$, PM_{10} , CO, CO₂ y la calidad del aire.



Figura 1.5 Contador de partículas con canales para partículas y calidad del aire

1.2.9 Criterios para la ubicación de equipos

En el Código de Regulaciones Federales de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (CFR 40) se encuentran los criterios para la localización de los sitios de muestreo para que el muestreo sea representativo, los criterios se enlistan a continuación:

- La toma de muestra debe ser de 2 a 15 m sobre el piso.
- La distancia más cercana a un árbol debe ser mayor a 20 metros de la circunferencia que marca el follaje o las raíces, pero si el árbol actúa como un obstáculo la distancia debe ser de por lo menos 10 m.
- La distancia a obstáculos como edificios debe ser mínimo el doble de la altura en que sobresale el obstáculo sobre el muestreador. Es recomendable un radio libre de 10 m.
- El flujo de aire del equipo no debe tener restricciones, 270° alrededor de la toma y/o 120° libre por encima del equipo.
- No deben existir flujos de hornos o incineración cercanos, por lo que la distancia mínima a la que debe encontrarse el sitio de muestreo de ese tipo de flujos es 20 m.

- El muestreador debe encontrarse a una distancia de 2 a 10 m de la línea de tráfico más cercana.

Existen consideraciones adicionales que se deben tomar en cuenta para el sitio de muestreo; debe ser de fácil acceso, necesita tener seguridad contra el vandalismo, contar con energía eléctrica segura y teléfono, además debe estar libre de obstáculos que afecten el flujo de aire en las cercanías del muestreador (Arciniégas, 2012).

1.2.10 Modelos de dispersión

Un modelo matemático de dispersión atmosférica busca simular el comportamiento de las plumas emitidas desde fuentes a nivel del terreno o a la altura de la chimenea (Wark y Warner, 2006). Los modelos de dispersión de emisiones atmosféricas se han empleado para estimar las concentraciones de los contaminantes en el aire, comúnmente son utilizados para determinar los efectos de las fuentes emisoras de contaminación de tipo puntual provenientes de zonas industriales sobre territorios poblados (Silva y Godoy, 2016). La aplicación de modelos y simulaciones permite indagar en los procesos que generan altas concentraciones de PM, también logran cuantificar la relación existente entre las emisiones y la concentración de contaminantes en la atmósfera; incluyendo la composición química del PM. Por lo que es posible identificar las afectaciones a la salud al tener una exposición prolongada a los contaminantes existentes en la zona de estudio logrando así, tomar decisiones para minimizar las afectaciones (Cuellar *et al.*, 2022).

1.2.11 Modelo de dispersión Gaussiano

Tiene por objetivo el poder observar la dispersión de un contaminante emitido por una fuente fija, para ello aplica una curva de distribución de tipo normal o también llamada de tipo Gaussiana. La pluma tiene un origen a una altura h de la chimenea, donde se incrementa la altura debido a la capacidad de flotación de los gases calientes Δh y por el movimiento de los gases que salen de la chimenea de forma vertical con una velocidad V_s . Para fines de cálculos, la pluma aparece como si se originará de una fuente puntual a una altura equivalente de la chimenea o altura efectiva, $H = h + \Delta h$. Dicho punto de origen queda también algo hacia atrás de la línea de centro de la posición de la chimenea para $x = 0$.

Para el modelo de dispersión es necesario considerar que la chimenea opera en estado estacionario, D_y y D_z son difusiones de masa despreciables en las direcciones del plano Y y Z,

la dirección a la que va el viento es x con una velocidad u , con una difusión constante en esa dirección D_x . Por lo que la fuente puntual parece estar situada en $x = 0$ y a una altura H . En la Ecuación 1.3 se representa la ecuación para poder emplear el modelo Gaussiano de dispersión (Wark y Warner, 2006).

$$C = Kx^{-1} \exp \left[- \left(\frac{y^2}{D_y} + \frac{z^2}{D_z} \right) \frac{u}{4x} \right] \quad (Ec. 1.3)$$

Donde:

K = constante cuyo valor está determinado por las condiciones de frontera del problema atmosférico específico.

1.2.12 Modelación de la dispersión

Los modelos de dispersión son utilizados para la evaluación del impacto de las fuentes de emisión de contaminantes bajo diferentes condiciones meteorológicas, además se emplean este tipo de modelos en plantas nucleares o químicas para definir la manera de actuar y la evaluación del impacto ambiental cuando existe la liberación accidental de alguna sustancia química a la atmósfera (Shankar, 2007). Dentro de los modelos de dispersión se encuentra el AERMOD y el ISC3.

1.2.12.1 AERMOD

El modelo de dispersión gaussiano AERMOD (Atmospheric Dispersion Modeling System) permite simular y describir el material particulado atmosférico; este tipo de modelo forma parte de los principios necesarios para una evaluación integral de inventarios de emisiones y se utiliza para verificar que las emisiones sean consistentes con el impacto registrado por un monitoreo, fue especialmente diseñado para apoyar a los programas de modelado de regulación de la EPA de los Estados Unidos. El modelo calcula la distribución de los contaminantes en una pluma de manera horizontal y vertical siguiendo un comportamiento de tipo normal, por lo que el modelo emplea el modelo de distribución Gaussiano (Ec. 1.3), incorporando algoritmos de dispersión para considerar las diferencias de cotas del terreno. Para su funcionamiento, AERMOD debe ser alimentado por tres fuentes de información: un archivo de entrada de flujos de emisiones y datos de las fuentes, un archivo meteorológico

generado por AERMET y un archivo de topografía digital (Ramos y Benítez, 2017; Silva y Godoy, 2016).

Este modelo está diseñado para simular la dispersión de contaminantes en la atmósfera, basándose en la estructura de turbulencia de la capa límite planetaria y en conceptos de escalado meteorológico. Desde el 9 de diciembre de 2006, AERMOD fue promulgado como el modelo regulatorio oficial, reemplazando al modelo ISC3 (Industrial Source Complex 3).

AERMOD utiliza un enfoque avanzado para modelar la dispersión de los contaminantes, permitiendo una representación más precisa de los procesos de mezcla y transporte de contaminantes en la atmósfera, especialmente en condiciones meteorológicas complejas. El modelo es capaz de manejar diferentes tipos de fuentes de emisión, incluyendo fuentes puntuales, de área, superficiales y elevadas; sin embargo, para cada fuente es necesario definir parámetros como el flujo de contaminante, el tipo de contaminante y las tasas de emisión. Así mismo puede trabajar con terrenos simples (superficies planas) como con terrenos complejos (topografía irregular). Esto se logra mediante el uso de datos digitales de elevación procesados con el software AERMAP. Además, cuenta con AERMET, un preprocesador de datos meteorológicos que incorpora la dispersión del aire basándose en la estructura de turbulencia de la capa límite planetaria junto con conceptos de escalado, este preprocesador toma los datos meteorológicos brutos y los convierte en un formato compatible.

Los receptores en AERMOD, son puntos georreferenciados donde se estiman las concentraciones de contaminantes, estos pueden ser definidos como puntos específicos, distribución uniforme en un área, a lo largo de una trayectoria y en zonas definidas. Su correcta definición es esencial para establecer los límites del modelo (EPA; 2025a, 2025b).

1.2.12.2 ISC3

El modelo ISC se basa en la línea recta y ecuación gaussiana de la pluma en estado estacionario, lo que permite modelar fuentes puntuales, de área, de volumen y de foso abierto estimando la concentración para cada variable meteorológica en cada hora, calculando los valores definidos por el usuario.

El modelo ISCST3 para chimeneas aplica la Ecuación 1.4, la cual es la ecuación gaussiana de la pluma en estado estacionario, donde el valor que se obtiene es la concentración horaria

a una distancia x . Para poder ejecutar el software son necesarios los archivos de los flujos y de las variables meteorológicas (Lazo *et al.*, 2006).

$$X = \frac{Q \cdot K \cdot V \cdot D}{2\pi \cdot u_s \cdot \sigma_y \cdot \sigma_z} \cdot \exp \left[-0.5 \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \quad Ec 1.4$$

Q: Tasa de emisión del contaminante

K: Coeficiente de escalamiento para convertir g/s en $\mu\text{g}/\text{m}^3$

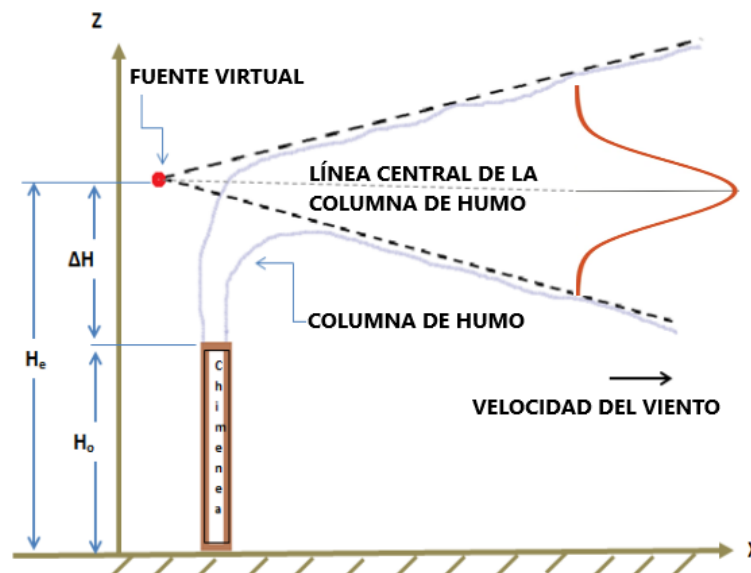
V: Término vertical

D: Término de decaimiento

σ_y y σ_z : Desviaciones estándar de distribución de concentración lateral y vertical

u_s : velocidad media del viento a la altura de la chimenea en m/s

El modelo Gaussiano sigue el comportamiento de la campana de Gauss (Figura 1.6) que expresa que la pluma de un contaminante en estado estacionario se irá moviendo en la dirección del viento y habrá una distancia donde la concentración del contaminante de comportará como una distribución gaussiana, por lo que la mayor concentración se encontrará en el centro de la pluma (Wark y Warner, 2006).



Fuente: Adaptado de Ramos *et al.*, 2016.

Figura 1.6 Comportamiento típico de una pluma de dispersión Gaussiana

1.2.13 Residuos sólidos urbanos

Se estima que a nivel mundial se producen 2.6 millones de t/día de RSU y esta cantidad podría alcanzar los 4.5 millones de t/día (Raza *et al.*, 2021). Para los RSU se tienen diferentes definiciones. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico los define como aquellos residuos que se generan en las casas habitación, en oficinas, instituciones, comercios, patios, jardines y barrido de calles; es decir, son los que son recogidos y tratados por los municipios, excluyendo los generados en la construcción, demolición y alcantarillado (Hoornweg y Bhada, 2012). En México los RSU son definidos por las normas oficiales como materiales de desecho generados en las casas habitación, establecimientos o vía pública debido a actividades domésticas, comerciales, industriales y de servicios, que se recolectan de forma conjunta. Estos residuos cuentan con características domiciliarias (productos de consumo, envases, embalajes, o empaques), son los desechos que se producen a diario (NOM-083-SEMARNAT-2003).

El problema de los RSU está relacionado con la forma en que los bienes o productos son consumidos por la población, ya que se tienen patrones de consumo desmedido que pueden llegar a catalogarse como voraces debido a que pasan a ser desechados rápidamente lo que genera problemáticas sociales y ambientales (Vidarte y Colmenares, 2020).

Los RSU que son generados en una región se encuentran influenciados por el desarrollo económico, el avance en la industrialización, los hábitos de la población y las variables meteorológicas, debido a que existe una relación entre el desarrollo económico y la urbanización con la generación de RSU, entre mayor sea el desarrollo económico y la urbanización mayor será la cantidad de RSU que se generan (Hoornweg y Bhada, 2012).

La Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) define la gestión integral de los residuos como el “Conjunto articulado e interrelacionado de acciones normativas, operativas, financieras, de planeación, administrativas, sociales, educativas, de monitoreo, supervisión y evaluación, para el manejo de residuos, desde su generación hasta la disposición final, a fin de lograr beneficios ambientales, la optimización económica de su manejo y su aceptación social, respondiendo a las necesidades y circunstancias de cada localidad o región”.

1.2.14 Disposición final de los residuos

La Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 define a un SDF como el lugar donde son depositados los RSU y de manejo especial de manera definitiva, la norma cuenta con las especificaciones para la instalación y operación de los SDF. Además, describe la metodología que debe seguirse para garantizar la protección al ambiente, para preservar el equilibrio ecológico y los recursos naturales, minimizando los efectos provocados por la inadecuada disposición de los RSU. La norma describe tres tipos de SDF, los cuales se presentan a continuación:

- a) Relleno sanitario. Es una obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los RSU y de manejo especial, con el fin de controlar, a través de la compactación e infraestructura adicional los impactos ambientales.
- b) Sitio controlado. Sitio inadecuado de disposición final que cumple con las especificaciones de un relleno sanitario en lo que se refiere a obras de infraestructura y operación, pero no cumple con las especificaciones de impermeabilización.
- c) Sitio no controlado. Sitio inadecuado de disposición final que no cumple con los requisitos establecidos en esta norma.

En México existen limitaciones financieras y de infraestructuras en los municipios pequeños para que puedan disponer de manera adecuada sus RSU, esto genera la búsqueda de alternativas para disponerlos, una es que vayan a los rellenos sanitarios de las cercanías, pero eso genera gastos de transporte y cuotas para poder disponer los RSU en sitios ajenos, y otra es dejarlos en tiraderos a cielo abierto, pero esta opción es la que más afecta al ambiente y entorno (Díaz *et al.*, 2017).

1.2.15 Operación de un sitio de disposición final

Durante la operación de los SDF se deben implementar revisiones periódicas y supervisiones de operación. Para los RESA en México, existen organismos encargados de hacer cumplir los lineamientos conforme a la normatividad federal, estatal y local, por lo cual se emplea la “Guía de Cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003”. Así mismo la Procuraduría de Protección al Ambiente (PROFEPA) es uno de los organismos encargados de hacer cumplir la

normatividad, así mismo solicita parámetros fisicoquímicos de lixiviados y biogás, además requiere que la caracterización de los RSU que llegan al RESA se realice por lo menos una vez al año, ya que con esta información se determina el contenido de carbono que puede transformarse en CO₂ y CH₄, con la finalidad de estimar las emisiones que generan para buscar un control sobre ellas (Díaz *et al.*, 2017).

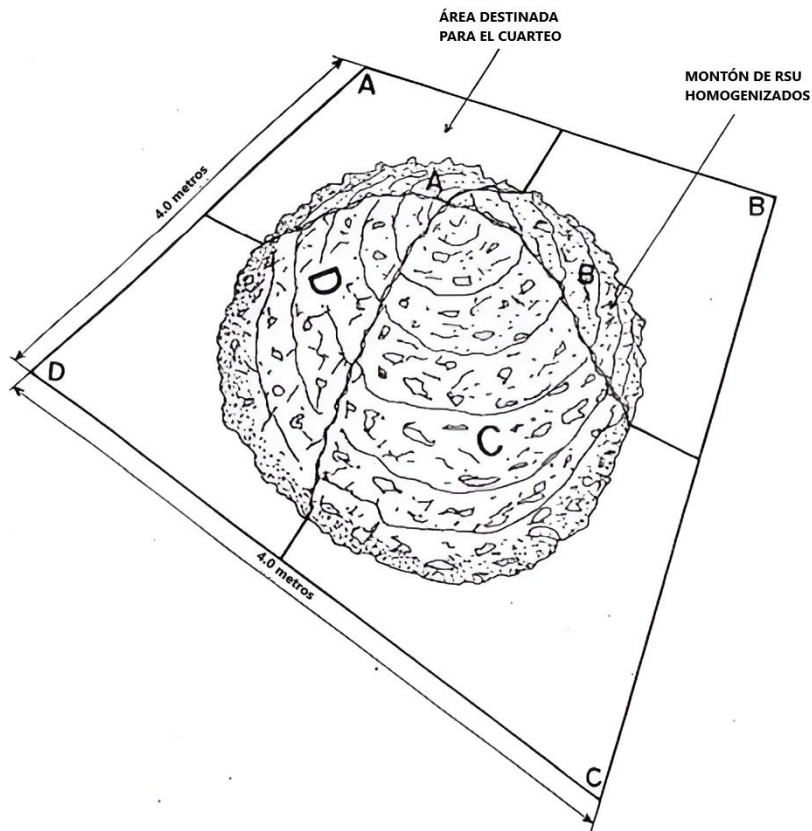
1.2.16 Caracterización fisicoquímica de un relleno

La caracterización fisicoquímica de un relleno sanitario permite identificar y evaluar los riesgos potenciales de contaminación del suelo, aire y agua, ayudando a implementar medidas de mitigación. Es por ello que es importante llevar a cabo una caracterización fisicoquímica de los RSU que llegan al sitio, el suelo, los lixiviados y el biogás que se genera dentro del relleno.

1.2.16.1 Residuos sólidos urbanos

Para la caracterización de los RSU se requiere aplicar la metodología descrita por la normatividad vigente. El muestreo de RSU en el SDF se debe llevar a cabo teniendo como base la Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2016 “Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra” para tener un muestreo representativo y en cuanto a la caracterización física se realiza mediante la Norma Mexicana NMX-AA-015-1985, la cual establece el método de cuarteo para RSU y la obtención de especímenes para análisis de laboratorio. Para realizar el método de cuarteo primero se debe homogenizar la muestra para posteriormente dividirla en cuatro partes iguales, las cuales son denominadas A, B, C y D (Figura 1.7), y se eliminan las partes opuestas; es decir, A y C o B y D. La operación se repite hasta tener un mínimo de 50 kg de RSU con los que se debe hacer la selección de subproductos aplicando la Norma Mexicana NMX-AA-22-1985.

Los subproductos son depositados en bolsas de polietileno y la clasificación se establece conforme a la norma: algodón, cartón, cuero, residuo fino (todo material que pase la criba M. 2.00), envase de cartón encerado, fibra dura vegetal (esclerénquima), fibras sintéticas, hueso, hule, lata, loza y cerámica, madera, material de construcción, material ferroso, material no ferroso, papel, pañal desechable, plástico rígido y de película, poliuretano, poliestireno expandido, residuos alimenticios, residuos de jardinería, trapo, vidrio de calor, vidrio transparente y otros.



Fuente: DOF, 1985a

Figura 1.7 Método de cuarteo definido en la NMX-AA-015-1985

De las partes eliminadas durante el método de cuarteo son tomados 10 kg de RSU para análisis de laboratorio, físicos, químicos y biológicos; con el resto se lleva a cabo la determinación de peso volumétrico, el cual está detallado en la Norma Mexicana MNX-AA-019-1985. Se requiere un recipiente metálico con forma cilíndrica con 200 L de capacidad, libre de abolladuras y limpio. El recipiente vacío es pesado, se registra el peso y es tomado como tara del recipiente, posteriormente es llenado con los RSU homogenizados, una vez que llega al tope se golpea el recipiente contra el suelo tres veces dejándolo caer desde una altura de 10 cm. Nuevamente se agregan residuos hasta el tope sin presionar cuando se esté llenando.

Para obtener el peso neto de los RSU se pesa el recipiente con estos y se resta el valor de la tara y para el cálculo se emplea la Ecuación 1.5, la cual define al peso volumétrico como el peso de los RSU (kg), por el volumen del recipiente (m^3)

$$P_V = \frac{P}{V} \quad Ec. 1.5$$

Donde:

P_v = peso volumétrico del residuo sólido, en kg/m^3

P = peso de los residuos sólidos (peso bruto menos tara), en kg

V = volumen del recipiente, en m^3

1.2.16.2 Lixiviados

El lixiviado en un SDF se genera mediante el agua de lluvia, la humedad contenida en los RSU y el agua que se produce en su degradación es un líquido que contiene altas cantidades de materia orgánica disuelta, sales, compuestos orgánicos y metales, por lo que son considerados como tóxicos y con afectaciones al ambiente y los ecosistemas circundantes al SDF (Teng *et al.*, 2021). El lixiviado generado en rellenos sanitarios tiene contiene una alta cantidad de compuestos orgánicos, inorgánicos y xenobióticos (Márquez y Sánchez, 2014). En la caracterización de lixiviados existe una situación, debido a que no existe normatividad para su caracterización se deben aplicar los métodos y técnicas estandarizadas para aguas residuales, naturales y residuales tratadas.

1.2.16.3 Suelo

En los SDF los caminos por los que transitan los camiones son suelos no pavimentados, esto provoca la generación de PM resuspendido debido a procesos de erosión, fenómenos meteorológicos o el mismo tránsito vehicular, lo que provoca el arrastre de polvo debido a la compresión y expansión del aire (Méndez *et al.*, 2017). Por lo que su caracterización es necesaria ya que puede influir en la contribución de PM en el aire. Para ello son empleadas las técnicas del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.) para llevar a cabo un muestreo superficial y aplicar la metodología del triángulo textural (FAO, 2009); con el objetivo de determinar la granulometría del suelo del área y así definirlo.

1.2.16.4 Biogás

Los RSU dispuestos en los SDF producen lixiviados y biogás durante el proceso de degradación (Ruoso *et al.*, 2022), es una degradación anaeróbica llevada a cabo por microorganismos que transforman el carbón orgánico en CO_2 y CH_4 (Kougias y Angelidaki, 2018). Comúnmente la degradación comienza alrededor de los seis u ocho meses después

de que fueron dispuestos los RSU y la producción de biogás se puede prolongar hasta 50 años después de que se clausuró el relleno sanitario (Díaz *et al.*, 2017). La combustión de CH₄ produce PM en menor cantidad que los combustibles convencionales pero el PM producido entra en la categoría de tamaño ultrafino (diámetro menor a 1.0 µm) (Xue *et al.*, 2018).

1.2.17 Partículas en sitios de disposición final

Los contaminantes generados en los SDF provocan efectos negativos en la salud ya que ingresan al cuerpo al ser inhalados y penetran en los pulmones produciendo enfermedades cardiovasculares, pulmonares y gastrointestinales (Raza *et al.*, 2021). La operación de los RESA provoca contaminación al aire ambiente, debido a que el procesamiento de los RSU se generan olores y polvo en el área circundante por lo que los trabajadores están expuestos a riesgos a la salud durante su jornada laboral, como la irritación de mucosas y afectaciones respiratorias (Abidin *et al.*, 2023).

Los RESA pueden considerarse fuentes fijas debido a la emisión de contaminantes atmosféricos, dentro de los contaminantes emitidos se encuentra el PM. El polvo se produce por procesos físicos y químicos que se llevan a cabo dentro del relleno sanitario; como el movimiento de los camiones pesados al pasar por caminos secos sin pavimentar y cuando descargan los RSU que levanta columnas de polvo que son afectadas por las condiciones del viento, la compactación de RSU (distribución mediante un compactador o triturador), la cobertura de los RSU, la quema de biogás que se genera en el relleno sanitario, erosión eólica y los bancos de tierra que se emplea para la cobertura que pueden ser afectadas por las condiciones meteorológicas de la zona (Abidin *et al.*, 2023; Jawwad *et al.*, 2023; Chalvatzaki *et al.*, 2010).

Los incendios dentro de sitios no controlados provocan la generación de compuestos orgánicos tóxicos al ambiente, además de una liberación importante de dioxinas. En Estados Unidos la quema incontrolada de RSU es considerada la mayor fuente de emisión de dioxinas. En los sitios no controlados se clasifican en dos tipos: superficiales y subterráneos; donde los superficiales son debidos a los RSU recientemente enterrados o no compactados, mientras que los subterráneos involucran RSU que se encuentran enterrados hace meses o años (Rim-Rukeh, 2014).

2. MÉTODO

El presente trabajo se desarrolló en cinco fases (Figura 2.1) diseñadas para determinar la dispersión de $PM_{2.5}$ y PM_{10} provenientes del RESA de Zinacantepec, Estado de México.

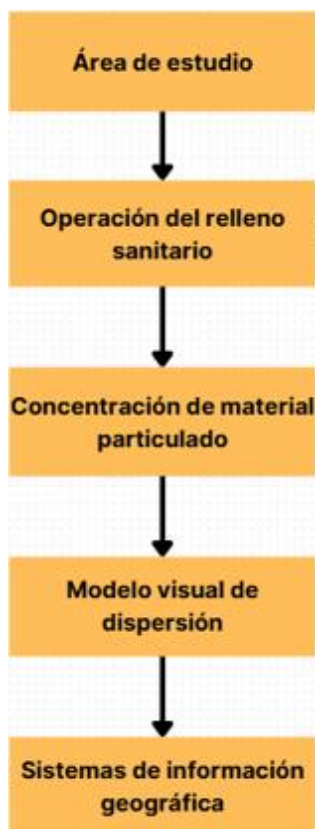


Figura 2.1 Diagrama de bloques del proyecto

La primer etapa consistió en un análisis del área de estudio, la delimitación georreferenciada del RESA, la caracterización climática regional y el análisis de las clases de vientos, la segunda fase es la operación del RESA que comprendió de análisis fisicoquímicos de RSU, el muestreo y caracterización de suelos, así como el análisis de los lixiviados generados, en la tercera fase se realizó un monitoreo in situ de PM mediante un contador de partículas para realizar mediciones estratificadas del RESA y obtener un registro general, los datos fueron tomados durante tres meses para registrar la concentración de cada zona y tener la validación del modelo visual de dispersión, en la cuarta fase se llevó a cabo el modelo visual de dispersión con el software AERMOD, para ejecutar el modelo se consideraron parámetros de entrada: matriz de vientos, topografía digital, obstáculos como el caso de edificios, la identificación de

las fuentes de generación de PM, áreas de disposición, rutas de vehículos pesados, áreas de excavación y bando de tierra, lo que permitió generar un mapa de concentración horaria y anual para $PM_{2.5}$ y otro para PM_{10} identificar las zonas de mayor impacto y finalmente la quinta fase se usó el sistema de información geográfica QGIS para georreferenciar los resultados y por medio de la superposición con capas de manchas urbanas se estimó a la población expuesta y también se identificaron los cuerpos de agua que son afectados por el PM. A continuación, se desarrollarán con detalle cada etapa de la experimentación.

2.1 ÁREA DE ESTUDIO

Para la localización del área de estudio se utilizó el mapa digital proporcionado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2025), el cual permitió identificar con precisión la ubicación geográfica del sitio. Complementariamente, se empleó el software Google Earth Pro, versión 7.1 (2025) para realizar una delimitación detallada del área. Esta combinación de herramientas permitió obtener una visión integral y georreferenciada del sitio y su entorno. Adicionalmente se utilizaron los softwares de WRPLOT View y AERMET para determinar el clima de la región y las clases de los vientos con datos desde el 2020 para definir la dispersión predominante de los contaminantes generados por el RESA.

2.2 OPERACIÓN DEL RELLENO SANITARIO

Para analizar la operación del RESA, se llevaron a cabo visitas guiadas al sitio, donde se observaron directamente las actividades diarias y la infraestructura disponible. Además, se llevaron a cabo entrevistas al personal operativo para obtener información detallada sobre los horarios de trabajo, los tiempos de operación, los vehículos que ingresan al sitio y el proceso de quema de biogás. Complementariamente, se revisaron los reportes oficiales que el RESA entrega a las autoridades, lo que permitió corroborar datos como los municipios a los que brinda servicio y aspectos operativos.

Para evaluar el cumplimiento de la normatividad, se aplicaron listas de verificación basadas en los parámetros establecidos en la NOM-083-SEMARNAT-2003. Estas listas permitieron verificar si el relleno sanitario opera conforme a los estándares ambientales y técnicos requeridos, asegurando un manejo adecuado de los residuos sólidos urbanos.

2.2.1 Caracterización de residuos sólidos urbanos

El muestreo superficial de los RSU se realizó conforme a la Norma Mexicana NMX-AA-132-SCFI-2006, seleccionando cinco puntos estratégicos. Posteriormente, se aplicó el método de cuarteo (NMX-AA-015-1985) para la separación de los RSU, obteniendo una muestra representativa y especímenes aptos para análisis de laboratorio. Para la cuantificación de subproductos derivados de los RSU se basó en lo establecido por la NMX-AA-022-1985 (DOF, 1985a; 1985b). Adicionalmente, a los residuos finos obtenidos del cribado de los RSU, se dejaron secar 24 horas a temperatura ambiente y para obtener su distribución granulométrica se cribaron con tamices según la escala ASTM (FAO, 2009). Por último, en laboratorio se obtuvo el porcentaje de humedad y cenizas de los residuos finos y se preparó una muestra reconstituida de los RSU, para ellos se siguió la técnica presentada en la NMX-AA-016-1984.

2.2.2 Caracterización de suelo

Para la caracterización de suelo, se seleccionaron tres zonas claves dentro del RESA: la zona de excavación (MC), la celda saneada (celda 8) y los caminos donde transitan vehículos pesados. En cada una de estas zonas, se realizaron tres muestreos superficiales de suelo aplicando las técnicas del S.U.C.S. para obtener una muestra compuesta representativa. En la Figura 2.2 se muestra la distribución de los nueve puntos de muestreo.

Las muestras compuestas se sometieron a un proceso de cribado utilizando mallas ASTM, comenzando con la malla número 10 (2 mm) hasta la malla número 400 (0.038 mm) y se empleó la metodología del triángulo textural (FAO, 2009) para determinar la granulometría tanto del suelo del área de estudio como del material de cobertura. Así mismo, a las muestras compuestas se les determinó el porcentaje de humedad adaptando la Norma Mexicana NMX-AA-016-1984 para ser aplicada en los suelos muestreados.



Fuente: Adaptado de Google Earth, 2024

Figura 2.2 Ubicación de los puntos de muestreo de suelo

2.3 CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO

Con base en la distribución del RESA, se implementó una red de monitoreo compuesta por nueve puntos estratégicos, dispuestos en tres triángulos para garantizar una cobertura espacial equilibrada (Figura 2.3). Los puntos de monitoreo abarcaron áreas clave del sitio:

- Punto A: Caseta de ingreso
- Punto B: Lombricomposta
- Punto C: Área administrativa y de mantenimiento
- Punto D: Zona de excavación
- Punto E: Caminos de tránsito vehicular
- Punto F: Frente de tiro
- Punto G: Celda saneada
- Punto H: Cárcamo
- Punto I: Banco de tierra



Fuente: Adaptado de Google Earth, 2025

Figura 2.3 Puntos de monitoreo de $PM_{2.5}$ y PM_{10}

Esta configuración permitió una representatividad espacial adecuada de las concentraciones de PM. Las mediciones se realizaron con un contador de partículas VT-9IN1, equipado con nueve canales para temperatura, humedad relativa, HCHO (formaldehídos), TVOC (compuestos orgánicos volátiles), $PM_{2.5}$, PM_{10} , CO, CO_2 y calidad del aire.

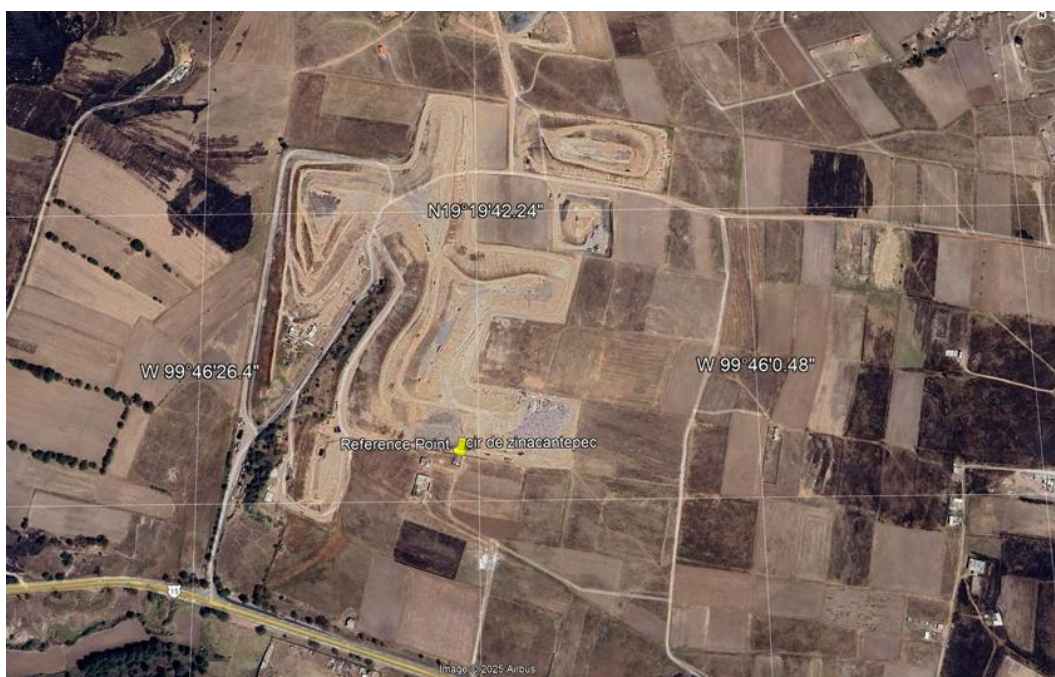
Siguiendo los criterios de Arciniégas (2012), el equipo se instaló en un radio libre de obstáculos de 10 m y una altura de 2 m sobre el nivel del suelo. Estas condiciones minimizaron interferencias y optimizaron el flujo de aire durante las mediciones. Los datos se capturaron en intervalos de 5 minutos, durante 5 horas continuas por día, replicando el proceso durante tres días distintos para cada punto. El monitoreo se llevó a cabo entre julio y septiembre de 2025, asegurando consistencia en las condiciones ambientales evaluadas.

2.4 MODELO VISUAL DE DISPERSIÓN

Para el modelo visual se empleó el software AERMOD View (versión 13.0.0) aprobado por la EPA, el cual es un modelo de dispersión Gaussiano de pluma en estado estacionario. Para obtener el modelo visual de dispersión se llevó a cabo siguiendo una secuencia metodológica de seis etapas que a continuación se describen.

2.4.1 Definición del área de estudio y fuentes de emisión

En este paso se identificó y georreferencio el área de estudio, incluyendo las coordenadas geográficas para lo cual se empleó Google Earth Pro, versión 7.1 (2025) obteniendo los límites del RESA que fueron aplicados en el modelado, además se georreferenciaron las fuentes de emisión de $PM_{2.5}$ y PM_{10} (Figura 2.4).



Fuente: Adaptado de Google Earth, 2025

Figura 2.4 Punto de referencia con coordenadas de los límites del RESA

Para las fuentes de emisión se emplearon los mismos puntos seleccionados para el monitoreo con el contador de partículas y las fuentes de emisión de PM se consideraron como fuente de área con un radio de 10 m y una altura de liberación de 1.2 m (Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Coordenadas y dimensiones de las fuentes de emisiones de PM

Identificación	Coordenadas	Dimensiones
A: Caseta de ingreso	Latitud: 19°19'31.96"N	Diámetro: 20 m.
	Longitud: 99°46'23.75"O	Alto: 1.2 m.
B: Lombricomposta	Latitud: 19°19'29.81"N	Diámetro: 20 m.
	Longitud: 99°46'20.55"O	Alto: 1.2 m.
C: Administración y mantenimiento	Latitud: 19°19'39.09"N	Diámetro: 20 m.
	Longitud: 99°46'21.39"O	Alto: 1.2 m.
D: Excavación	Latitud: 19°19'35.62"N	Diámetro: 20 m.
	Longitud: 99°46'11.37"O	Alto: 1.2 m.
E: Camino de tránsito vehicular	Latitud: 19°19'40.35"N	Diámetro: 20 m.
	Longitud: 99°46'15.66"O	Alto: 1.2 m.
F: Frente de tiro	Latitud: 19°19'41.18"N	Diámetro: 20 m.
	Longitud: 99°46'8.11"O	Alto: 1.2 m.
G: Celda saneada	Latitud: 19°19'45.29"N	Diámetro: 20 m.
	Longitud: 99°46'9.46"O	Alto: 1.2 m.
H: Cárcamo	Latitud: 19°19'44.05"N	Diámetro: 20 m.
	Longitud: 99°46'13.83"O	Alto: 1.2 m.
I: Banco de tierra	Latitud: 19°19'50.25"N	Diámetro: 20 m.
	Longitud: 99°46'12.04"O	Alto: 1.2 m.

Una vez definidas las fuentes de emisión se calcularon las tasas de emisión según la operación del sitio utilizando la norma AP-42: "Compilation of Air Pollutant Emission Factors" de la EPA, siendo que la zona de estudio es un RESA y las fuentes son consideradas de área se toman como referencia los capítulos específicos de "fuentes misceláneas". A continuación, se establecen las ecuaciones de cálculo y las tasas de emisión.

- Para el punto "E: Camino de tránsito vehicular" (polvo de caminos). Se sigue la ecuación de la EPA AP-42 (capítulo 13.2.2, Eq. 1ª), adaptada para unidades métricas (Kg/VKT) para los caminos no pavimentados empleando el peso de los camiones, el número de viajes y el contenido de limo del camino para tener la emisión por vehículo-kilómetro-recorrido. La Ecuación 2.1 es el cálculo del factor de emisión (E), la Ecuación 2.2 es el cálculo de la emisión diaria total (M) y la Ecuación 2.3 es la conversión a tasa de emisión de área (Q).

$$E = k \cdot \left(\frac{s}{12}\right)^a \cdot \left(\frac{W}{3}\right)^b \quad Ec 2.1$$

$$M = E \times N \times L_{Km} \quad Ec 2.2$$

$$Q = \frac{M_{Kg/día} \times 1000g/Kg}{T_{act} \times A_{m^2}} \quad Ec 2.3$$

Donde:

k, a y b son constantes (véase la tabla A1)

E: Factor de emisión específico por tamaño, en Kg/VMT

s: Contenido de limo del material de superficie, en %

W: Peso medio del vehículo, en ton

M: Emisión diaria total, en gr/día

N: Viajes diarios totales (movimientos/día)

L_{Km}: Longitud del camino, en Km

Q: Tasa de emisión de área, en gr/(s×m²)

T_{act}: Tiempo de operación, en s

A_{m²}: Área de operación, en m²

- Para los puntos “D: Excavación”, “F: Frente de tiro” e “I: Banco de tierra” (Manejo de materiales). Se utilizó la ecuación del capítulo 13.2.4, la ecuación 2.4 utiliza valores de actividades de carga y descarga de material, movimiento de bulldozers, etc. Una vez teniendo el factor de emisión se emplearon las Ec 2.2 y 2.3 para obtener la emisión diaria total (M) y la tasa de emisión de área (Q).

$$E = k \cdot (0.0016) \cdot \frac{(U/2.2)^{1.3}}{(M/2)^{1.4}} \quad Ec 2.4$$

Donde:

k es el multiplicador de tamaño de partícula, que es una constante (tabla A2)

E: Factor de emisión, en Kg/ton

U: Velocidad media del viento, en m/s

M: Contenido de humedad del material, en %

Punto “G: Celda saneada” (Erosión eólica). Para el caso de la celda saneada las emisiones por erosión eólica son considerablemente bajas ya que el suelo del área está estabilizado y compactado.

2.4.2 Meteorología

Se procesaron los datos meteorológicos horarios y de radio sondeo de cinco años, el periodo de 2020 a 2024 mediante el software AERMET de la EPA. Estos datos fueron proporcionados por la estación meteorológica de Toluca.

AERMET tiene tres pasos; el primero es la extracción y chequeo de los datos, posteriormente es la unión de todos los datos meteorológicos y finalmente el cálculo de variables secundarias y la creación de los archivos meteorológicos compatibles con AERMOD.

Los datos de entrada que requiere AERMOD son los siguientes:

1. Dirección del viento
2. Velocidad el viento
3. Temperatura de bulbo seco
4. Temperatura de bulbo húmedo
5. Presión atmosférica
6. Humedad relativa
7. Precipitación
8. Radiación solar horizontal

En AERMET, la clasificación de uso de suelo es necesaria para estimar el albedo, la tasa de Bowen y la rugosidad de la superficie, siendo estos datos de entrada para el software. Se modeló mediante el software AERSURFACE de la EPA, las imágenes satelitales del RESA para determinar el uso de suelo. a compatibles con AERMOD.

2.4.3 Zona de estudio

AERMAP es el pre-procesador de los datos de terreno para AERMOD. A partir de un Modelo Digital de Elevación (MDE) de la zona se obtienen los datos de elevación de terreno para determinar las alturas de las bases sobre el nivel del mar. Mediante este software de la EPA se procesaron los datos de elevación del terreno con la finalidad de determinar las alturas de las bases sobre el nivel del mar de los edificios del RESA, las fuentes generadoras de $PM_{2.5}$ y PM_{10} y de los receptores. La base de datos utilizada correspondió a la SRTM3 (Global).

Con el apoyo de Google Earth se posicionaron y georreferenciaron los edificios y estructuras que se encuentran fuera del RESA. Por último, se utilizó el preprocesador BPIP (Building Profile Input Program) de la EPA para estudiar el efecto de la interferencia de las plumas de emisión por la presencia de los edificios y estructuras. Al ser una zona rural no es requisito el ingreso de la población.

2.4.4 Receptores

Los receptores son los puntos donde el modelo AERMOD calcula las concentraciones de contaminantes. Se definieron en base al área del RESA y la altura de emisión de las fuentes de área. Los datos de entrada fueron los siguientes:

1. Datos meteorológicos creados con AERMET
2. Datos de superficie empleando AERSURFACE
3. Resultados del cálculo de la tasa de emisión de $PM_{2.5}$ y PM_{10}
4. Google Earth para georreferenciar los edificios y las fuentes de emisión

2.4.5 Modelación

En esta etapa se procedió a modelar los parámetros $PM_{2.5}$ y PM_{10} en AERMOD con todos los datos obtenidos, los resultados son presentados en mapas espaciales con gráficos de curvas de nivel de concentración con promedios horarios y anuales. Contrastando los resultados con los límites establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021

2.5 SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Con el objetivo de analizar las zonas de afectación por la concentración de material particulado (PM) en el RESA, se utilizó la base de datos del Sistema de Información Geográfica para la Evaluación del Impacto Ambiental (SIGEIA), proporcionada por la Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

Mediante el software QGIS versión 3.10 A Coruña, se rastreó la ubicación del RESA y se visualizaron las áreas impactadas por la concentración y movilización de PM, obtenidas a través del modelado en AERMOD. Este proceso permitió generar mapas detallados que reflejan la distribución espacial de las concentraciones de PM, facilitando la identificación de las zonas más afectadas y su relación con las actividades desarrolladas en el sitio.

3. RESULTADOS

En esta sección, primero se presenta el área de estudio, su delimitación, clima y las clases de vientos de la región, posteriormente se observará los procesos que son llevados a cabo junto con un análisis fisicoquímico a los RSU, suelo y lixiviados muestreados en el RESA. Seguido de los resultados del monitoreo con el contador de partículas de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en las zonas dentro del RESA. Por último, se muestran los resultados del modelo visual de dispersión comparándolos con el sistema de información geográfica QGIS con datos obtenidos de SIGEIA para definir los impactos provenientes del PM generado en el RESA.

3.1 ÁREA DE ESTUDIO

De acuerdo con el mapa digital INEGI, se identifica al RESA de Zinacantepec, Estado de México como: Sitio de disposición final. Mantenimiento y servicios ambientales y está ubicado en las coordenadas, $19^{\circ} 19' 25.93''$ latitud norte y $99^{\circ} 46' 25.93''$ longitud oeste (19.327566477173924 -99.772511311308591); con una altitud de 2,721 metros sobre el nivel del mar como se puede observar en la Figura 3.1.



Fuente: Mapa digital INEGI, 2024

Figura 3.1 Localización del SDF de Zinacantepec, Estado de México

La Figura 3.2 muestra la delimitación del RESA de Zinacantepec, Estado de México, mediante una fotografía aérea capturada el 18 de marzo de 2025 (Google Earth, 2025). En las inmediaciones del sitio se identifica el asilo "Abriendo Caminos Nueva Esperanza", actualmente en estado de abandono. Su infraestructura se localiza a aproximadamente 35 m del camino principal por donde circulan vehículos pesados. Esta proximidad es un factor para considerar en el modelado de $PM_{2.5}$ y PM_{10} .



Fuente: Adaptado de Google Earth, 2024

Figura 3.2 Delimitación del SDF de Zinacantepec, Estado de México

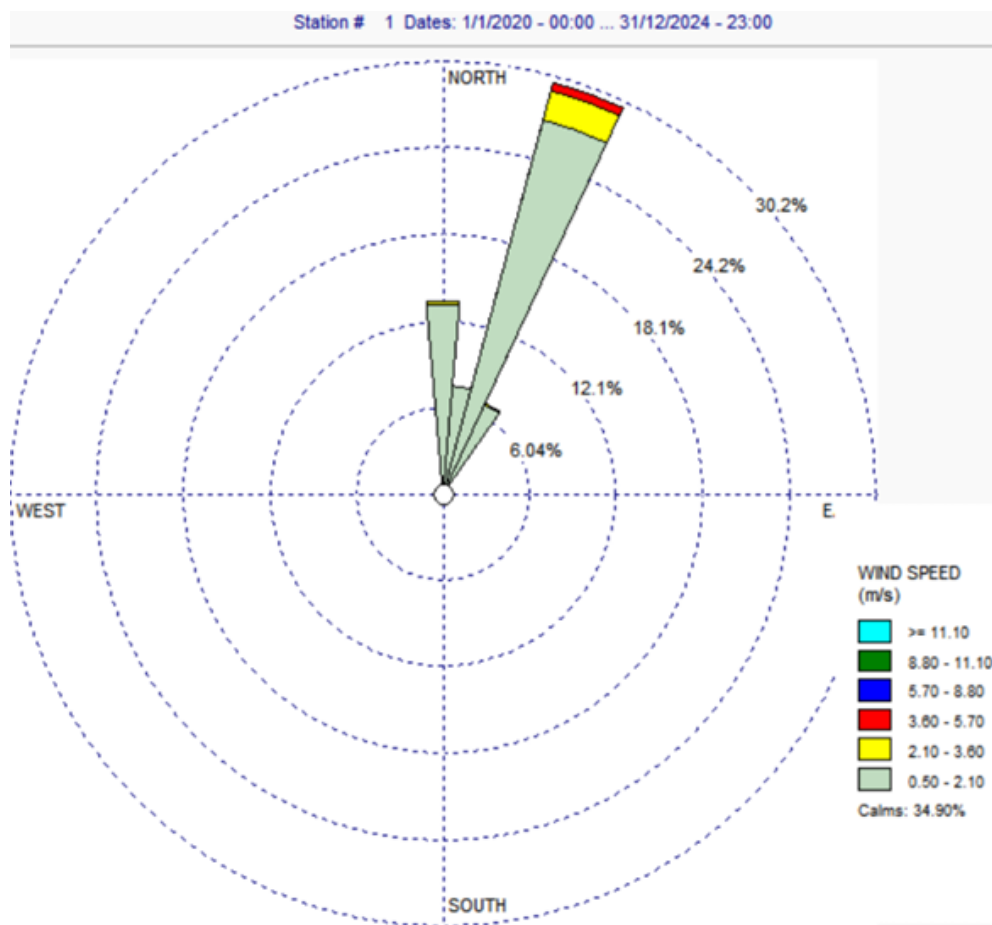
En la zona predomina el clima templado subhúmedo, este se caracteriza por inviernos secos y fríos, y veranos templados con lluvias abundantes. La temporada de lluvias (mayo a octubre) favorece el control natural del polvo, mientras que la temporada seca (noviembre a abril) es crítica para la resuspensión de polvo en los caminos no pavimentados.

Debido a su proximidad con el Nevado de Toluca, la zona experimenta:

- Vientos catabáticos: Flujos de aire frío que descienden por las laderas del volcán, especialmente durante la noche y madrugada, lo que puede afectar la dirección de la pluma de dispersión hacia el valle.

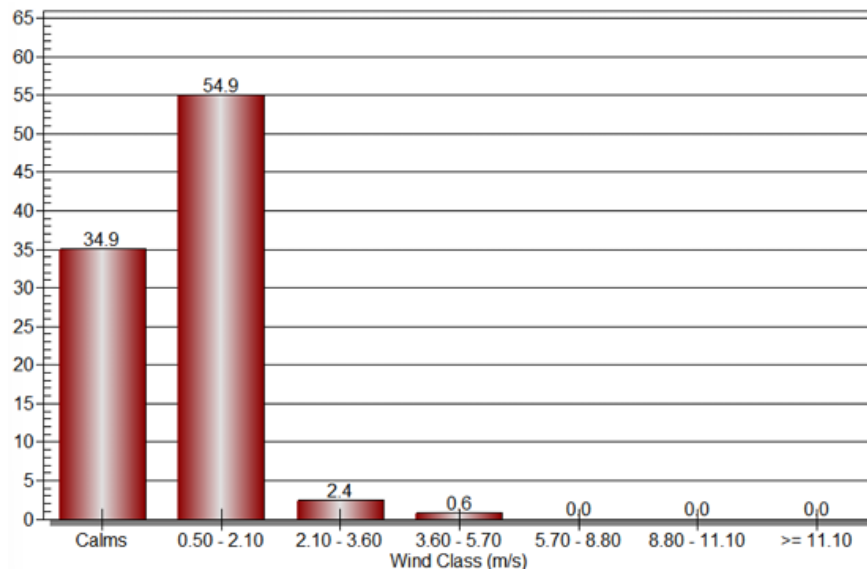
- Inversiones Térmicas: Comunes en el Valle de Toluca durante las mañanas de invierno, lo que dificulta la dispersión vertical de las partículas (PM_{10} y $PM_{2.5}$).

La dispersión predominante sigue la dirección de los vientos dominantes del sector norte, esto se aprecia en la rosa de los vientos (Figura 3.3) y la distribución de frecuencias (Figura 3.4). Los datos fueron recopilados desde enero 2020 hasta diciembre 2024.



Fuente: Adecuación WRPLOT

Figura 3.3 Rosa de los vientos



Fuente: Adecuación WRPLOT

Figura 3.4 Frecuencia de los vientos

3.2 OPERACIÓN DEL RELLENO

El RESA opera bajo los lineamientos establecidos en la NOM-083-SEMARNAT-2003 y cumple con los requisitos de la Norma Técnica Estatal para Centros Integrales de Residuos (NTEA-20-SEMAGEM-RS-2019) (SEMAGEM, 2019). Este sitio cuenta con dos tecnologías para el aprovechamiento de RSU. Actualmente, dispone de 12 celdas para la disposición de RSU, de las cuales 10 están clausuradas, 1 se encuentra en operación y 1 está en construcción (Figura 3.5). La disposición de los residuos se lleva a cabo durante una jornada operativa de 12 horas, en la que se realizan actividades como el pesaje en báscula, captura de lixiviados y quema de biogás, compactación y cubrimiento de los residuos con tierra. Además, el sitio cuenta con geomembrana, cerca perimetral, sistemas de control de acceso y admisión de residuos, asegurando un manejo seguro de los RSU evitando que ingresen residuos de otra índole.

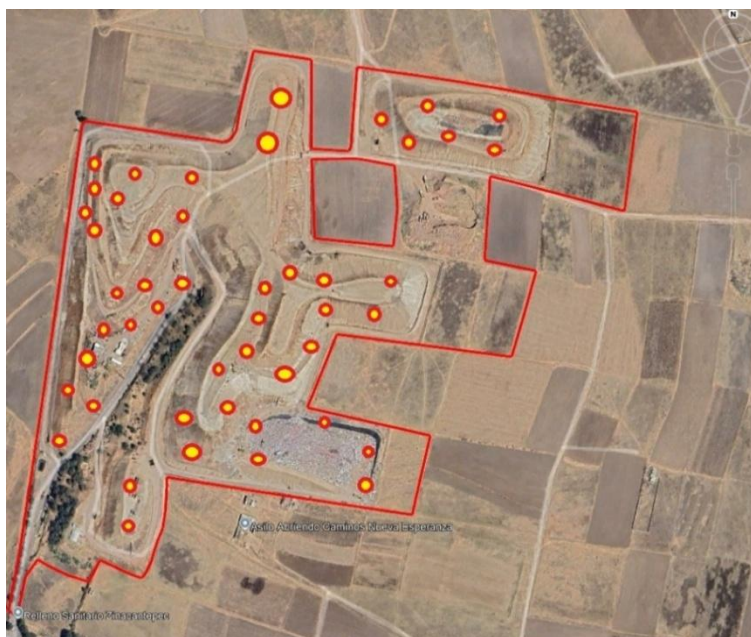
Brinda servicio a los municipios de Atlacomulco, Ixtlahuaca, Temoaya, Zinacantepec, Toluca, Almoloya de Juárez e Ixtapan del Oro, recibiendo entre 900 y 1300 toneladas diarias de RSU, dependiendo de la temporada. Teniendo un promedio diario de 175 ingresos de camiones, de los cuales ingresan de tipo cilindro, tolva, transfer, contenedor, carga trasera, góndola y volteo, y el tipo de combustible que emplean es diesel o gasolina. En el manejo de los RSU, el sitio

cuenta con 6 lagunas de lixiviados y 53 pozos de venteo de biogás (Figura 3.6), lo que permite un control adecuado de los subproductos generados.



Fuente: Centro Integral de Residuos Zinacantepec

Figura 3.5 Distribución del RESA de Zinacantepec



Fuente: Adaptado de Google Earth, 2024

Figura 3.6 Ubicación de pozos de venteo dentro del RESA

3.2.1 Caracterización de residuos sólidos urbanos

La muestra total de RSU utilizada para el cuarteo fue de 400 kg, mientras que la muestra destinada a caracterización física de subproductos fue de 105.44 kg. De esta última, se reconstruyó una muestra para análisis de humedad y para la granulometría de los residuos finos.

Como se detalla en la Tabla 3.1, la distribución de los RSU que llegan al RESA, bajo una estimación promedio de 1100 t/d, muestra que la mayor proporción corresponde a la categoría "varios" (52.822 %). Estos residuos, debido a su grado de degradación ya no son separables ni aprovechables. No obstante, según Saldaña *et al.* (2013), los residuos con potencial de recuperación son los orgánicos, plásticos, papel y cartón, los cuales representan el 29.84% de los RSU que ingresan al RESA. Esto equivale a 328.26 t/d de materiales susceptibles de ser valorizados.

Tabla 3.1 Composición física de los RSU

Tipo de residuo	Porcentaje (%)	Cantidad (t/d)
Cartón	5.140	56.544
Residuo fino	3.964	43.608
Cartón encerado	1.683	18.518
Hule	0.218	2.399
Lata	1.276	14.032
Loza y cerámica	0.280	3.078
Madera	1.612	17.735
Papel	1.408	15.492
Pañal desechable	7.284	80.121
PET	1.385	15.231
P. Alta densidad	2.750	30.254
Cucharas	0.156	1.721
P. Baja densidad	4.467	49.137
Laminado	1.005	11.058
Poliuretano	0.801	8.815

Tabla 3.1 Composición física de los RSU (Continuación)

Tipo de residuo	Porcentaje (%)	Cantidad (t/d)
Poliestireno exp	0.678	7.459
Alimenticios	8.061	88.676
Trapo	3.367	37.035
Vidrio de color	1.641	18.048
Varios	52.822	581.037
Total	100	1100

La determinación de cenizas y humedad se realizó tanto para los RSU como para los residuos finos. Para los RSU, se preparó una muestra reconstituida basada en los porcentajes obtenidos de la selección de subproductos. Los resultados indicaron que los RSU presentaron un 11.09 % de humedad y un 32.09 % de cenizas, mientras que los residuos finos registraron un contenido de cenizas significativamente mayor (75.86 %) y una menor proporción de humedad (8.47%) (Figura 3.7).

Herrera *et al.* (2016) menciona que la humedad en los RSU está relacionada con el porcentaje de residuos orgánicos presentes, y el rango óptimo para procesos de compostaje oscila entre 45 y 55%. Sin embargo, Los resultados sugieren una alta presencia de materia inorgánica en los RSU y los residuos finos, lo que podría estar relacionado con procesos de degradación.

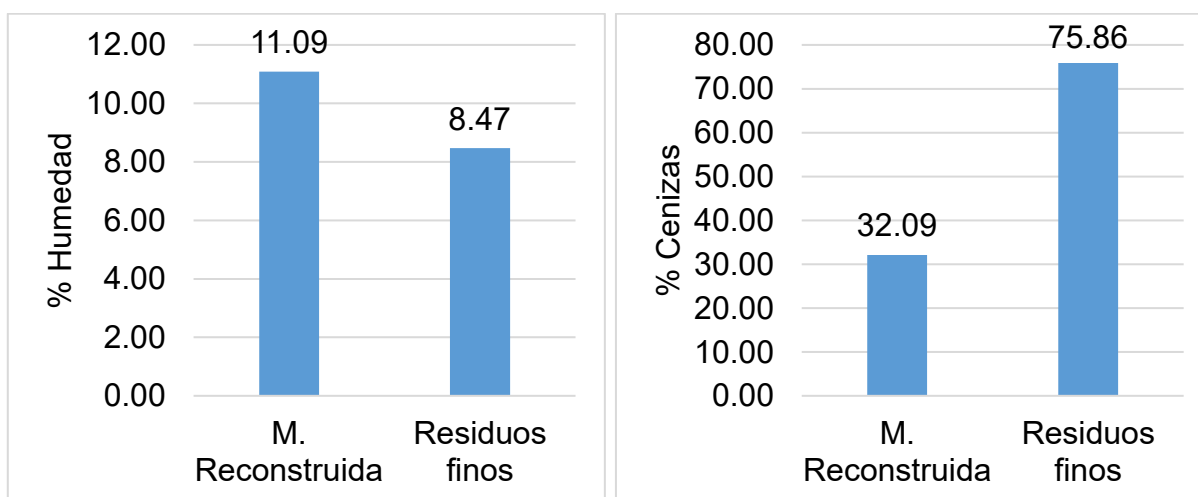


Figura 3.7 Porcentaje de humedad y cenizas de RSU y residuos finos

Los residuos finos obtenidos del cribado de los RSU se dejaron secar durante 24 horas a temperatura ambiente. Para determinar su distribución granulométrica, se procedió a cribarlos utilizando tamices según la escala ASTM (FAO, 2009). La Tabla 3.2 muestra la distribución del tamaño de partícula de estos residuos finos después del proceso de cribado, empleando mallas con aberturas que van desde la número 10 (2.00 mm) hasta la número 400 (0.038 mm). Los residuos que lograron atravesar la malla 400 presentan un diámetro inferior a 0.038 mm (38 μm), lo que sugiere que pueden incluir partículas de tamaños tan pequeños como 10 μm e incluso 2.5 μm . Estas partículas se clasifican dentro de los rangos correspondientes a PST, PM₁₀ y PM_{2.5}. Debido a su tamaño reducido, tienen la capacidad de penetrar en el sistema respiratorio humano, lo que podría generar efectos adversos para la salud, tal como lo reportaron Correa *et al.* en 2023.

Tabla 3.2 Distribución del tamaño de partícula de los residuos finos

N° de malla	Apertura (mm)	Peso (g)	Composición (%)
10	2	250	28.47
20	0.85	275	31.32
30	0.60	120	13.67
40	0.425	75	8.54
50	0.30	70	5.69
60	0.25	20	2.28
100	0.15	50	5.69
200	0.075	35	3.99
325	0.045	0.6	0.07
400	0.038	1	0.11
Mayor a 400	Menor a 0.038	1.5	0.17

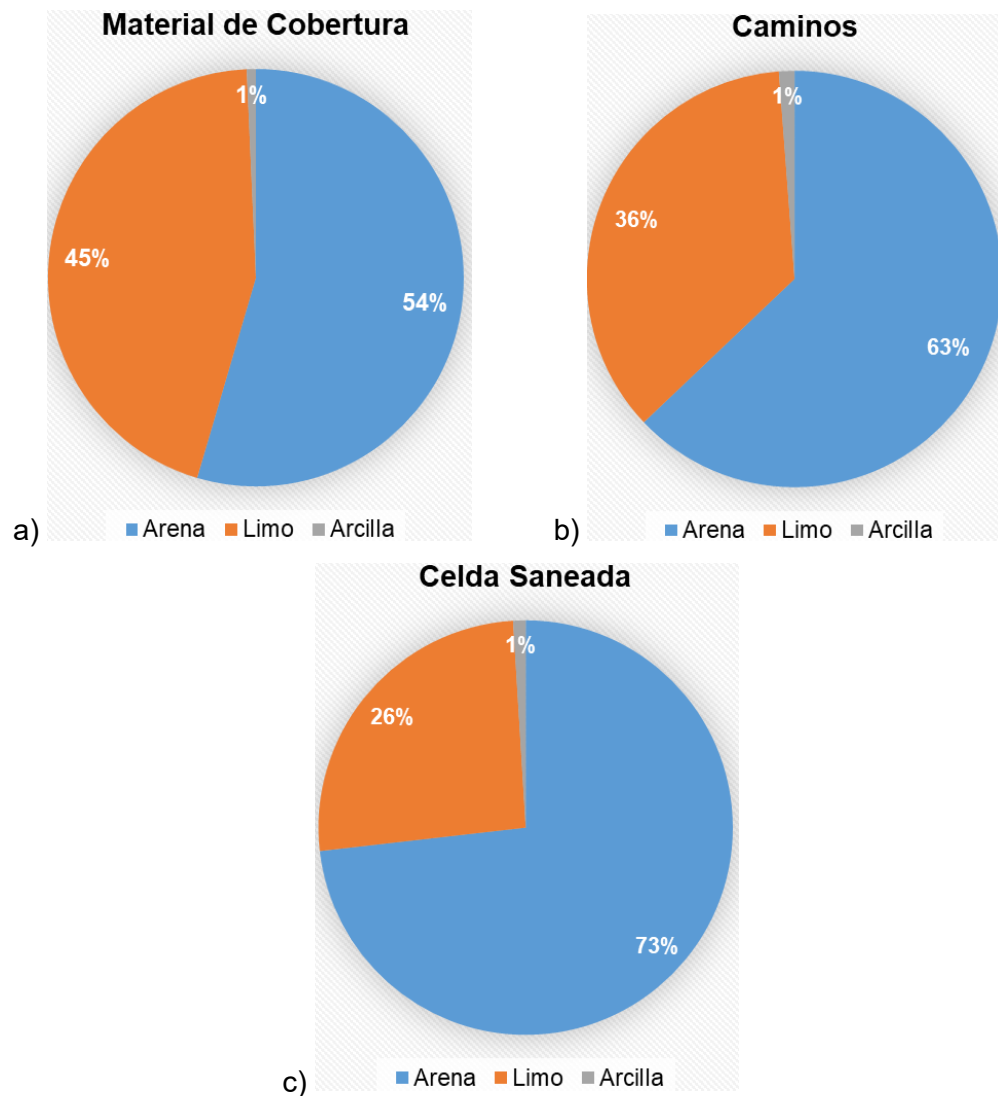
3.2.2 Caracterización de suelo

La caracterización de suelo por granulometría se realizó con base en los lineamientos de la FAO (2009), la cual establece tres categorías para el tamaño de partícula:

- Arcilla: partículas menores a 0.02 mm.
- Limo: partículas entre 0.02 y 0.05 mm.

- Arena: partículas entre 0.05 y 2 mm.

La distribución de partículas en cada muestra se presenta en la Figura 3.8.



a) Muestra compuesta del material de cobertura; b) Muestra compuesta de los caminos; c) Muestra compuesta de la celda saneada (celda 8)

Figura 3.8 Tipo de suelo en cada zona muestreada dentro del RESA

Aunque la celda saneada mostró un mayor porcentaje de arena en comparación con las otras zonas, los tres tipos de suelo se clasificaron como franco arenoso. Este tipo de suelo se caracteriza por contener entre el 43 y el 85% de arena, un 0 a 50% de limo y un 0 a 20% de arcilla (Gabriels y Lobo, 2006). La humedad de las muestras compuestas fue idéntica, por lo que se afirma que la humedad del suelo y del material de cobertura del RESA es del 1.12%.

3.3 CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO

La Figura 3.9 muestra la concentración promedio de $PM_{2.5}$ durante los tres días de monitoreo para cada punto. Se observa que la zona de excavación (Punto D) presentó las concentraciones más altas, manteniéndose consistentemente por encima de $150 \mu g/m^3$. Por su parte, el frente de tiro (Punto F) registró el pico más elevado del periodo, superando los $200 \mu g/m^3$ en uno de los días.

En cuanto a las PM_{10} , la Figura 3.10 revela que la zona de excavación (Punto D) mantuvo concentraciones superiores a $200 \mu g/m^3$ durante los tres días, alcanzando en dos de ellos niveles por encima de $250 \mu g/m^3$. El frente de tiro (Punto F) también registró una concentración máxima superior a $250 \mu g/m^3$, siendo esta la única zona, junto con la excavación, en alcanzar dichos valores.

Un hallazgo relevante es el comportamiento contrastante en la zona de caminos durante el tercer día, donde la concentración de $PM_{2.5}$ superó a la de PM_{10} . Este patrón sugiere una menor contribución del tránsito vehicular (asociado típicamente a PM_{10}) y un mayor aporte de procesos de combustión, ya que las partículas finas ($PM_{2.5}$) son generadas principalmente por la quema de combustibles fósiles (Hamanaka y Mutlu, 2018). Además, cabe destacar que las concentraciones de PM_{10} en esta zona se mantuvieron dentro de los límites recomendados por la OMS, lo que refuerza la hipótesis de una menor actividad vehicular ese día.

La Tabla 3.3 presenta los promedios de PM y gases de combustión obtenidos durante el periodo de monitoreo. Los resultados indican que las concentraciones de PM_{10} superan a las de $PM_{2.5}$, lo cual contrasta con los hallazgos reportados por Opara et al. (2021). En su estudio, realizado en siete tiraderos periféricos de Owerri (Nigeria) mediante contadores de partículas, se observó que las concentraciones de $PM_{2.5}$ eran mayores que las de PM_{10} .

Esta discrepancia podría explicarse por las condiciones específicas de los RESA, donde las actividades de cobertura de RSU y el tránsito vehicular generan mayor cantidad de polvo y partículas gruesas (PM_{10}). Por lo tanto, los datos obtenidos respaldan la tendencia de que, en los RESA, las concentraciones de PM_{10} suelen ser más altas que las de $PM_{2.5}$.

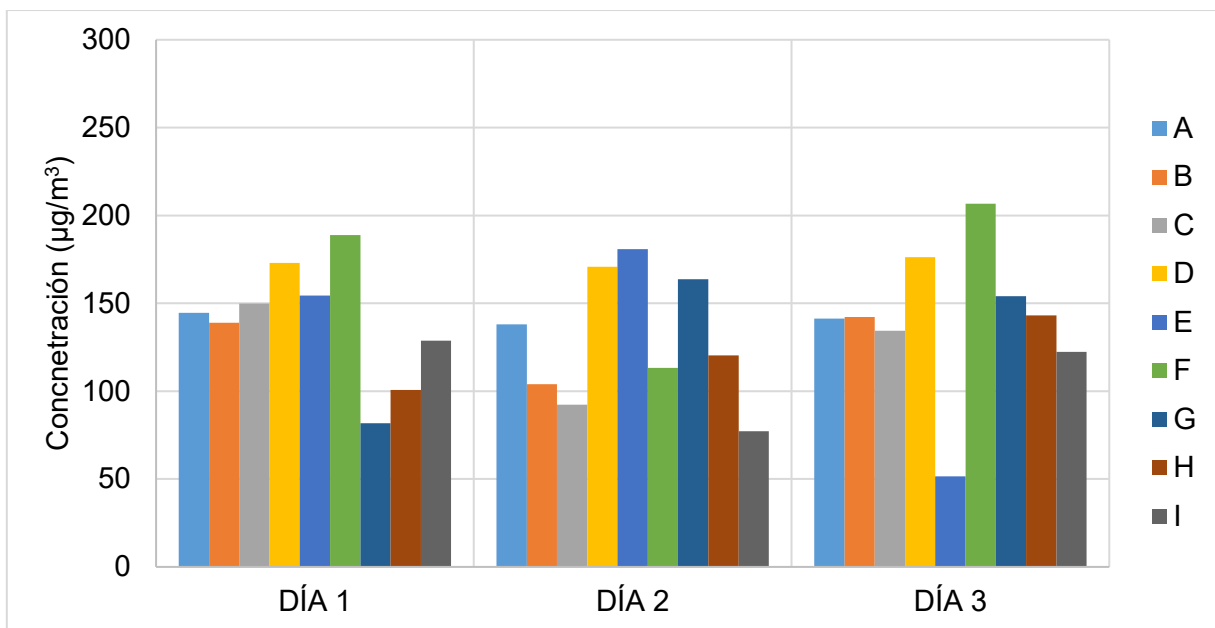


Figura 3.9 Concentración de PM_{2.5} en cada punto de monitoreo

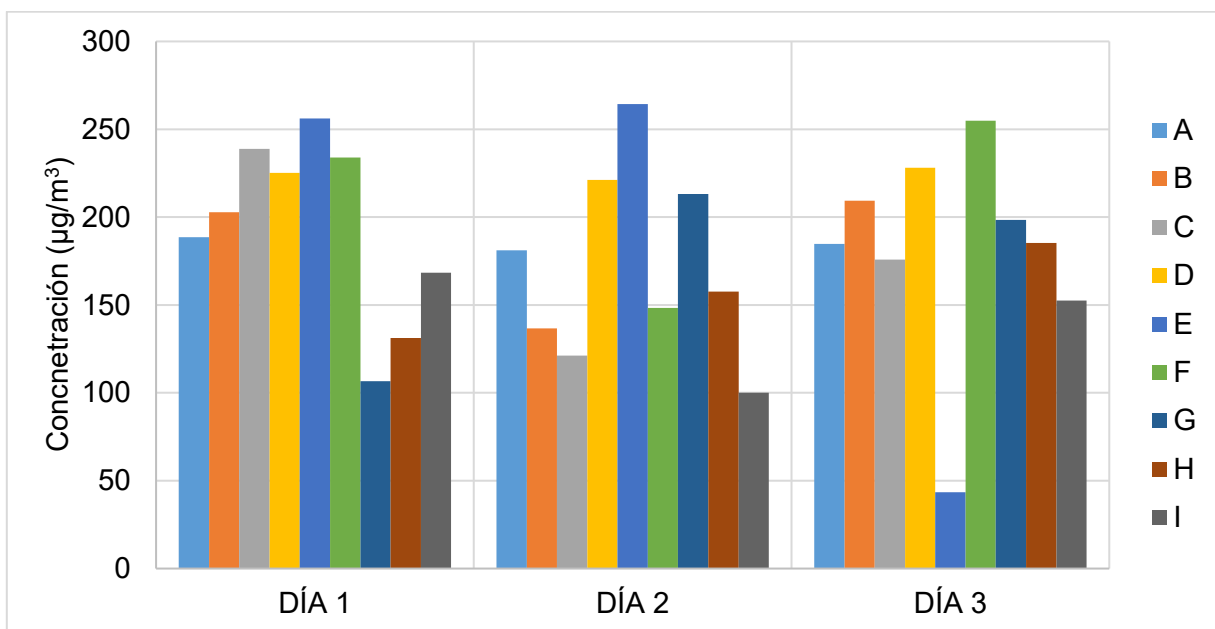


Figura 3.10 Concentración de PM₁₀ en cada punto de monitoreo

Tabla 3.3 Medición de PM

Punto	PM _{2.5} (µg/m³)	PM ₁₀ (µg/m³)	CO (ppm)	CO ₂ (ppm)
A: Caseta de ingreso	141.34 ± 4.68	184.79 ± 5.29	1.56 ± 0.07	499.25 ± 69.57
B: Lombricomposta	128.41 ± 21.20	182.96 ± 40.18	1.32 ± 0.17	511.28 ± 172.87
C: Administración	125.54 ± 29.84	178.63 ± 58.92	2.97 ± 1.64	556.05 ± 214.59
D: Excavación	173.36 ± 31.73	224.86 ± 40.39	5.38 ± 8.66	1289.12 ± 1011.03
E: Caminos	128.94 ± 68.24	187.97 ± 125.29	1.39 ± 0.24	538.73 ± 99.24
F: Frente de tiro	169.60 ± 49.64	212.44 ± 56.48	23.73 ± 33.95	1459.76 ± 1042.20
G: Celda saneada	133.22 ± 44.75	172.77 ± 57.75	1.85 ± 0.81	539.26 ± 172.69
H: Cárcamo	121.42 ± 21.24	158.04 ± 27.01	19.71 ± 31.34	1499.73 ± 1471.73
I: Banco de tierra	109.43 ± 28.11	140.34 ± 35.74	0.84 ± 0.51	641.45 ± 401.13

3.4 MODELO VISUAL DE DISPERSIÓN

Para la elaboración del modelo primero se definieron las opciones de dispersión (Figura 3.11) para poder ingresar los datos de meteorología, topografía, las tasas de emisión de PM, definir los receptores y determinar la ubicación y dimensión de los edificios fuera del RESA.

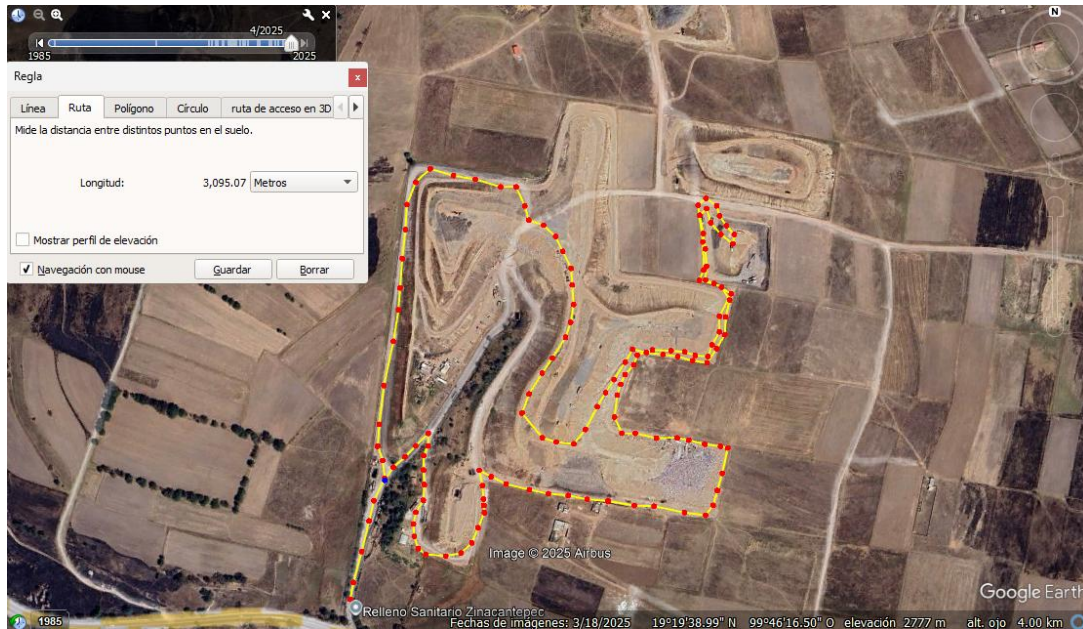
Dispersion Options	
Titles C:\Lakes\AERMOD View\CIR De Zinacantepec_2025_PM10\CIR De Zinacantep	
Dispersion Options ☒ Regulatory Default ☐ Non-Default Options	Dispersion Coefficient Rural
	Output Type ☒ Concentration ☐ Total Deposition (Dry & Wet) ☐ Dry Deposition ☐ Wet Deposition
	Plume Depletion ☐ Dry Removal ☐ Wet Removal
	Output Warnings ☐ No Output Warnings ☐ Non-fatal Warnings for Non-sequential Met Data
Pollutant / Averaging Time / Terrain Options	
Pollutant Type PM10	Exponential Decay Option not available
Averaging Time Options Hours: ☒ 1 ☐ 2 ☐ 3 ☐ 4 ☐ 6 ☐ 8 ☐ 12 ☐ 24 ☐ Month ☐ Period ☒ Annual	Terrain Height Options ☐ Flat ☒ Elevated SO: Meters RE: Meters TG: Meters
Flagpole Receptors ☒ Yes ☐ No Default Height = 1.20 m	

Fuente: Generado con AERMOD, 2025

Figura 3.11 Selección de las opciones de dispersión

3.4.1 Tasa de emisión de PM_{2.5} y PM₁₀

Para el caso del “Punto E: Camino de tránsito vehicular”, se requirió la longitud y ancho del camino, siendo este de 3,095 m x 16 m (Figura 3.12). También se requirió el porcentaje de limo del camino, el peso promedio de los vehículos, los viajes diarios, el área de la fuente y el tiempo de operación para aplicar las Ec. 2.1, 2.2 y 2.3.



Fuente: Adaptado de Google Earth, 2025

Figura 3.12 Dimensiones del camino

Para PM₁₀:

$$E = 1.5 \cdot \left(\frac{3.6\%}{12} \right)^{0.9} \cdot \left(\frac{13.56 \text{ ton}}{3} \right)^{0.45} = 1.00072 \text{ Kg/VKT}$$

Para el caso de los viajes diarios, ingresan 175 camiones, pero es un viaje de ida y uno de vuelta, por lo tanto, son 350.

$$M = 1.00072 \times 350 \text{ movimientos/día} \times 3.09565 \text{ Km} = 1084.25787 \text{ Kg/día}$$

Para el área se multiplicó la longitud por el ancho del camino y el horario de operación fue considerado de 24 h para el manejo del AERMOD, ese tiempo se convirtió en segundos.

$$Q = \frac{1084.25787 \text{ Kg/día} \times 1000 \text{ g/Kg}}{86,400 \text{ s} \times 49,520 \text{ m}^2} = 2.534184 \times 10^{-4} \frac{\text{g}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

Para PM_{2.5}:

$$E = 0.15 \cdot \left(\frac{3.6\%}{12}\right)^{0.9} \cdot \left(\frac{13.56 \text{ ton}}{3}\right)^{0.45} = 0.100072 \text{ Kg/VKT}$$

$$M = 0.100072 \times 350 \text{ movimientos/día} \times 3.09565 \text{ Km} = 108.425787 \text{ Kg/día}$$

$$Q = \frac{1084.25787 \text{ Kg/día} \times 1000 \text{ g/Kg}}{86,400 \text{ s} \times 49,520 \text{ m}^2} = 2.534184 \times 10^{-5} \frac{\text{g}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

Para el caso del “Punto D: Excavación”, el “Punto F: Frente de tiro” y el “Punto I: Banco de tierra” para obtener el factor de emisión específico se empleó la Ec. 2.4. Teniendo una velocidad promedio del viento de 0.62 m/s.

“Punto D: Excavación”. Se excava y se transporta un promedio de 5,000 ton/día de tierra. El área de fuente se obtuvo por medio de Google Earth (2025), dando un área total de 9,503 m². El suelo tuvo una humedad de 1.12%. Por lo que el cálculo de la emisión de PM_{2.5} y PM₁₀ por área se obtuvo de la siguiente manera.

Para PM₁₀:

$$E = 0.35 \cdot (0.0016) \cdot \frac{\left(\frac{0.62 \text{ m/s}}{2.2}\right)^{1.3}}{\left(\frac{1.12\%}{2}\right)^{1.4}} = 2.430438 \times 10^{-4} \text{ Kg/ton}$$

Para la emisión total diaria M, el factor de emisión fue multiplicado por la cantidad de tierra excavada y transportada.

$$M = 2.430438 \times 10^{-4} \text{ Kg/ton} \times 5,000 \text{ ton/día} = 1.215219 \text{ kg/día}$$

Para obtener la tasa de emisión de área se empleó el área de la fuente.

$$Q = \frac{1.215219 \text{ Kg/día} \times 1000 \text{ g/Kg}}{86,400 \text{ s} \times 9,503 \text{ m}^2} = 1.480062 \times 10^{-6} \frac{\text{g}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

Para PM_{2.5}:

$$E = 0.053 \cdot (0.0016) \cdot \frac{\left(\frac{0.62 \text{ m/s}}{2.2}\right)^{1.3}}{\left(\frac{1.12\%}{2}\right)^{1.4}} = 3.680377 \times 10^{-5} \text{ Kg/ton}$$

$$M = 3.680377 \times 10^{-5} \text{ Kg/ton} \times 5,000 \text{ ton/día} = 0.184019 \text{ kg/día}$$

$$Q = \frac{0.184019 \text{ Kg/día} \times 1000 \text{ g/Kg}}{86,400 \text{ s} \times 9,503 \text{ m}^2} = 2.241237 \times 10^{-7} \frac{\text{g}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

“Punto F: Frente de tiro”. Se descarga un promedio de 1,100 ton/día de RSU. El área de fuente se obtuvo empleando Google Earth (2025), dando un área total de 9,503 m². Los RSU tuvieron un porcentaje de humedad de 11.09%. Por lo que las ecuaciones quedaron de la siguiente manera:

Para PM₁₀:

$$E = 0.35 \cdot (0.0016) \cdot \frac{\left(\frac{0.62 \text{ m/s}}{2.2}\right)^{1.3}}{\left(\frac{11.09\%}{2}\right)^{1.4}} = 9.810374 \times 10^{-6} \text{ Kg/ton}$$

Para la emisión total diaria M, se multiplicó el factor de emisión por la cantidad de RSU que son dispuestos en el RESA

$$M = 9.810374 \times 10^{-6} \text{ Kg/ton} \times 1,100 \text{ ton/día} = 0.010791 \text{ kg/día}$$

Para la tasa de emisión de área se empleó el área de la fuente.

$$Q = \frac{0.010791 \text{ Kg/día} \times 1000 \text{ g/Kg}}{86,400 \text{ s} \times 9,503 \text{ m}^2} = 1.314328 \times 10^{-8} \frac{\text{g}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

Para PM_{2.5}:

$$E = 0.053 \cdot (0.0016) \cdot \frac{\left(\frac{0.62 \text{ m/s}}{2.2}\right)^{1.3}}{\left(\frac{11.09\%}{2}\right)^{1.4}} = 1.485571 \times 10^{-6} \text{ Kg/ton}$$

$$M = 1.485571 \times 10^{-6} \text{ Kg/ton} \times 1,100 \text{ ton/día} = 0.001634 \text{ kg/día}$$

$$Q = \frac{0.001634 \text{ Kg/día} \times 1000 \text{ g/Kg}}{86,400 \text{ s} \times 9,503 \text{ m}^2} = 1.990268 \times 10^{-9} \frac{\text{g}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

“Punto I: Banco de tierra”. Se transportan 5,000 ton/día de tierra. El área de fuente se obtuvo por medio de Google Earth (2025), dando un área total de 10,671 m². El suelo tuvo una humedad de 1.12%. Por lo que el cálculo de la emisión de PM_{2.5} y PM₁₀ por área se realizó de manera similar al punto de la excavación.

Para PM₁₀:

$$E = 0.35 \cdot (0.0016) \cdot \frac{\left(\frac{0.62 \text{ m/s}}{2.2}\right)^{1.3}}{\left(\frac{1.12\%}{2}\right)^{1.4}} = 2.430438 \times 10^{-4} \text{ Kg/ton}$$

$$M = 2.430438 \times 10^{-4} \text{ Kg/ton} \times 5,000 \text{ ton/día} = 1.215219 \text{ kg/día}$$

$$Q = \frac{1.215219 \text{ Kg/día} \times 1000 \text{ g/Kg}}{86,400 \text{ s} \times 10,671 \text{ m}^2} = 1.318061 \times 10^{-6} \frac{\text{g}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

Para PM_{2.5}:

$$E = 0.053 \cdot (0.0016) \cdot \frac{\left(\frac{0.62 \text{ m/s}}{2.2}\right)^{1.3}}{\left(\frac{1.12\%}{2}\right)^{1.4}} = 3.680377 \times 10^{-5} \text{ Kg/ton}$$

$$M = 3.680377 \times 10^{-5} \text{ Kg/ton} \times 5,000 \text{ ton/día} = 0.184019 \text{ kg/día}$$

$$Q = \frac{0.184019 \text{ Kg/día} \times 1000 \text{ g/Kg}}{86,400 \text{ s} \times 9,503 \text{ m}^2} = 1.995921 \times 10^{-7} \frac{\text{g}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

La Tabla 3.4 muestra las tasas de emisión por área para cada punto seleccionado, aunque en un inicio se consideraron todos los puntos que fueron monitoreados con el contador, al final se decidió realizar con estos puntos ya que la parte de caminos ya contempla zonas como la caseta, mantenimiento entre otras, por lo que se designaron los puntos más relevantes y los caminos.

Tabla 3.4 Tasas de emisión de PM_{2.5} y PM₁₀

Fuente	Actividad	PM _{2.5} [gr/(s×m ²)]	PM ₁₀ [gr/(s×m ²)]
E: Camino de tránsito vehicular	Resuspensión vehicular	2.534184×10^{-6}	2.534184×10^{-5}
D: Excavación	Movimiento de tierra	2.241237×10^{-7}	1.480062×10^{-6}
I: Banco de tierra	Movimiento de tierra	1.995921×10^{-7}	1.318061×10^{-6}
F: Frente de tiro	Descarga de residuos	1.990268×10^{-9}	1.314328×10^{-8}
G: Celda saneada	Erosión eólica (compactada)	1×10^{-6}	0

Por medio del análisis de las emisiones de PM de tipo de área en los puntos seleccionados se observa que la fuente de impacto no es la combustión, ni los procesos llevados a cabo en el RESA, sino la resuspensión mecánica de polvo en los caminos no pavimentados y zonas de maniobra.

3.4.2 Meteorología

Los datos meteorológicos utilizados en este estudio fueron recabados por la estación meteorológica de Toluca. A partir de estos, se generó un archivo de perfiles meteorológicos (PROFILE), el cual contiene registros horarios de perfiles verticales con las siguientes variables: altura, temperatura, velocidad del viento, dirección del viento y parámetros de estabilidad atmosférica

Para garantizar la correcta ejecución del modelo, fue esencial eliminar datos vacíos o inconsistentes, ya que AERMOD no procesa archivos con información faltante. La conversión de los datos meteorológicos brutos al formato PROFILE se realizó mediante el preprocesador AERMET, herramienta oficial de AERMOD y diseñada para adaptar los datos a los requerimientos del modelo de dispersión. Una vez procesado el archivo se pueden observar los datos de entrada para la parte de meteorología como se observa en la Figura 3.13.

Met Input Data

Surface Met Data

Filename: ..\Toluca-Mexico.SFC
Format Type: Default AERMET format

Profile Met Data

Filename: ..\Toluca-Mexico.PFL
Format Type: Default AERMET format

Wind Speed

☐ Wind Speeds are Vector Mean (Not Scalar Means)

Wind Direction

Rotation Adjustment [deg]:

Potential Temperature Profile

Base Elevation above MSL (for Primary Met Tower): 2,685.00 [m]

Meteorological Station Data

Stations	Station No.	Year	X Coordinate [m]	Y Coordinate [m]	Station Name
Surface		2020			
Upper Air		2020			

Data Period

Data Period to Process

Start Date: 1/1/2020 Start Hour: 1 End Date: 31/12/2024 End Hour: 24

Wind Speed Categories

Stability Category	Wind Speed [m/s]	Stability Category	Wind Speed [m/s]
A	1.54	D	8.23
B	3.09	E	10.8
C	5.14	F	No Upper Bound

Fuente: Generado con AERMOD, 2025

Figura 3.13 Datos de entrada de meteorología

3.4.3 Estructuras fuera del RESA

Para la implementación del modelo, fue necesario identificar y localizar las estructuras y edificios ubicados fuera de la delimitación del RESA. En la Figura 3.14 se muestran las tres estructuras registradas: dos posibles casas abandonadas (identificadas como E1 y E2) y el asilo "Abriendo Caminos Nueva Esperanza", también en estado de abandono (E3).



Fuente: Mapa digital INEGI, 2025

Figura 3.14 Ubicación de estructuras fuera de la limitación del RESA

Las coordenadas geográficas y las dimensiones de cada una de estas estructuras se detallan en la Tabla 3.5. Estos datos fueron esenciales para su incorporación en el software AERMOD, permitiendo un modelado más preciso de las condiciones ambientales en el área de estudio.

Tabla 3.5 Coordenadas y dimensiones de estructuras fuera el RESA

Identificación	Coordenadas	Dimensiones
E1: Casa en abandono	Latitud: 19°19'31.00"N Longitud: 99°46'14.47"O	Largo: 13.37 m. Ancho: 11.82 m. Alto: 4 m.
E2: Casa en abandono	Latitud: 19°19'30.98"N Longitud: 99°46'15.93"O	Largo: 14.6 m. Ancho: 10.44 m. Alto: 4 m.
E3: Asilo en abandono	Latitud: 19°19'29.96"N Longitud: 99°46'16.10"O	Largo: 28.8 m. Ancho: 19.35 m. Alto: 6 m.

3.4.4 Receptores

Los receptores se definieron mediante una gradilla cartesiana de 4,950 x 4,950 m con una resolución de 50 x 50 m y a 1.2 m de altura respecto al nivel del suelo. Con un total en la grilla de 10,000 receptores. No fueron considerados receptores discretos En la Figura 3.15 se muestra como fueron definidos los receptores para el modelado.

Receptor Networks

Note: Terrain Elevations and Flagpole Heights for Network Grids are in Page RE2 - 1 (If applicable)
Generated Discrete Receptors for Multi-Tier (Risk) Grid and Receptor Locations for Fenceline Grid are in Page RE3 - 1 (If applicable)

Uniform Cartesian Grid

Receptor Network ID	Grid Origin X Coordinate [m]	Grid Origin Y Coordinate [m]	No. of X-Axis Receptors	No. of Y-Axis Receptors	Spacing for X-Axis [m]	Spacing for Y-Axis [m]
UCART1	416549.33	2134793.09	100	100	50.00	50.00

Discrete Receptors

Fuente: Generado con AERMOD, 2025

Figura 3.15 Datos de entrada de los receptores

3.4.5 Resultados del modelo visual de dispersión

En la Tabla 3.6 se presentan los resultados de PM₁₀, además se presentan los gráficos de curvas de nivel de concentración generados con el software AERMOD durante 1 h (Figura 3.16), 24 h (Figura 3.17) y para un año (Figura 3.18)

Tabla 3.6 Estudio de emisiones de PM₁₀

Parámetro	Valor determinado (µg/m ³)	Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021
PM ₁₀ (1 h)	432.3818	N.E.
PM ₁₀ (24 h)	279.1891	70
PM ₁₀ (1 año)	203.6315	36

Para el caso de las emisiones de PM_{2.5} se presentan en la Tabla 3.7, así mismo se pueden observar los modelados con AERMOD para su dispersión durante 1 h (Figura 3.19), 24 h (Figura 3.20) y anual (Figura 3.21).

Tabla 3.7 Estudio de emisiones de PM_{2.5}

Parámetro	Valor determinado (µg/m ³)	Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2021
PM _{2.5} (1 h)	40.5165	N.E.
PM _{2.5} (24 h)	27.9186	41
PM _{2.5} (1 año)	20.2605	10

Los resultados obtenidos mediante la aplicación del modelo de dispersión AERMOD para los contaminantes PM_{2.5} y PM₁₀ revelan que, dentro del RESA, las concentraciones de PM₁₀ superan los límites establecidos por la NOM-025-SSA1-2021. Por otro lado, las concentraciones de PM_{2.5} exceden el valor anual permitido por dicha norma, lo que indica un impacto significativo en la calidad del aire asociado a estas partículas.

La simulación muestra que la generación de PM₁₀ en los RESA es considerablemente mayor que la de PM_{2.5}, con una concentración 10 veces superior. Este hallazgo coincide con estudios previos como el realizado por Ramadan y colaboradores (2025) que realizan mediciones de PM₁₀ y PM_{2.5} en varias zonas del RESA de Jatibarang, demostrando predominancia de partículas gruesas, atribuible principalmente a actividades como la cobertura de residuos y el movimiento de maquinaria pesada, las cuales generan polvo y partículas de mayor tamaño.

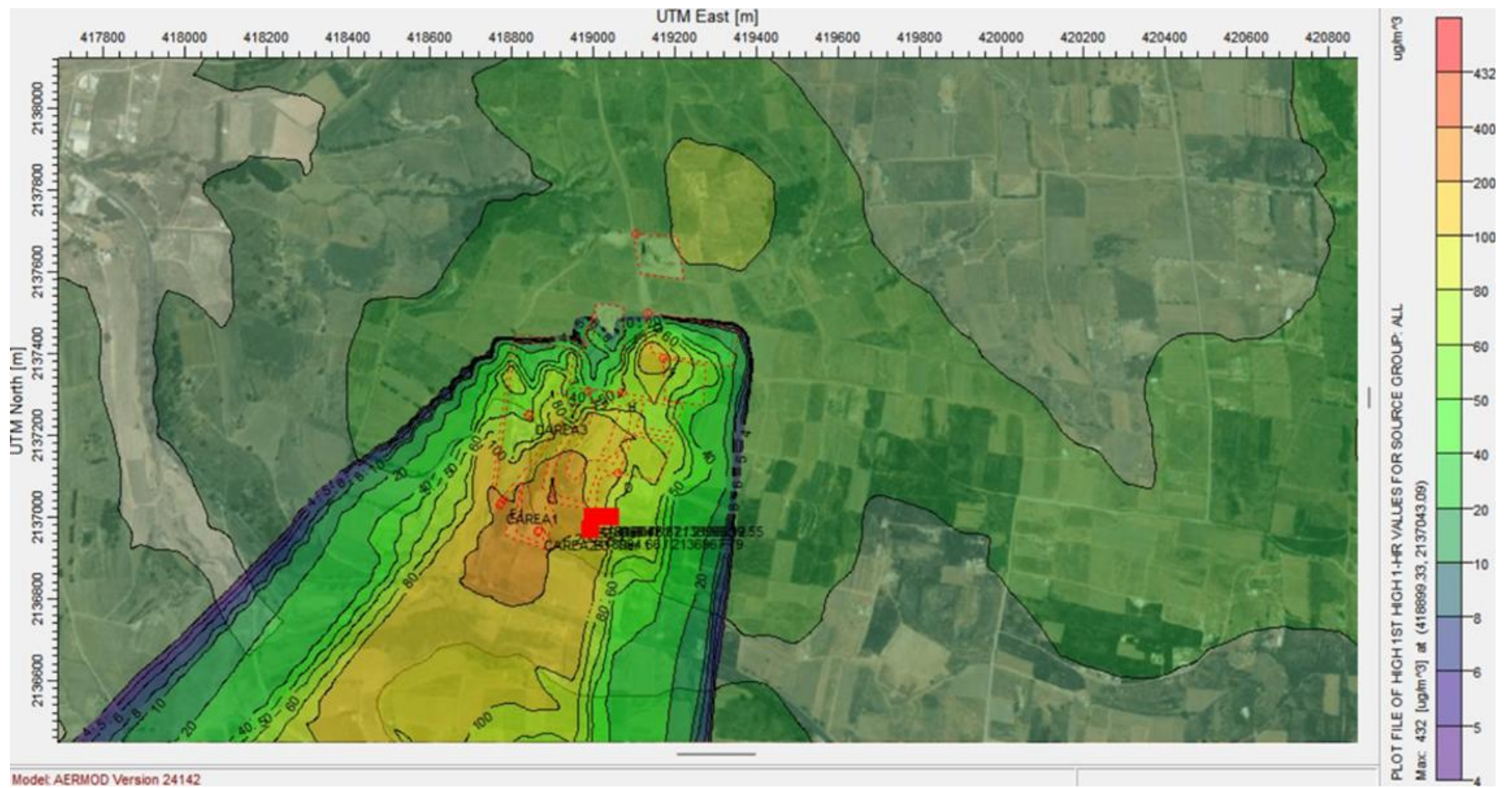


Figura 3.16 Modelado de la concentración de PM_{10} durante 1 h

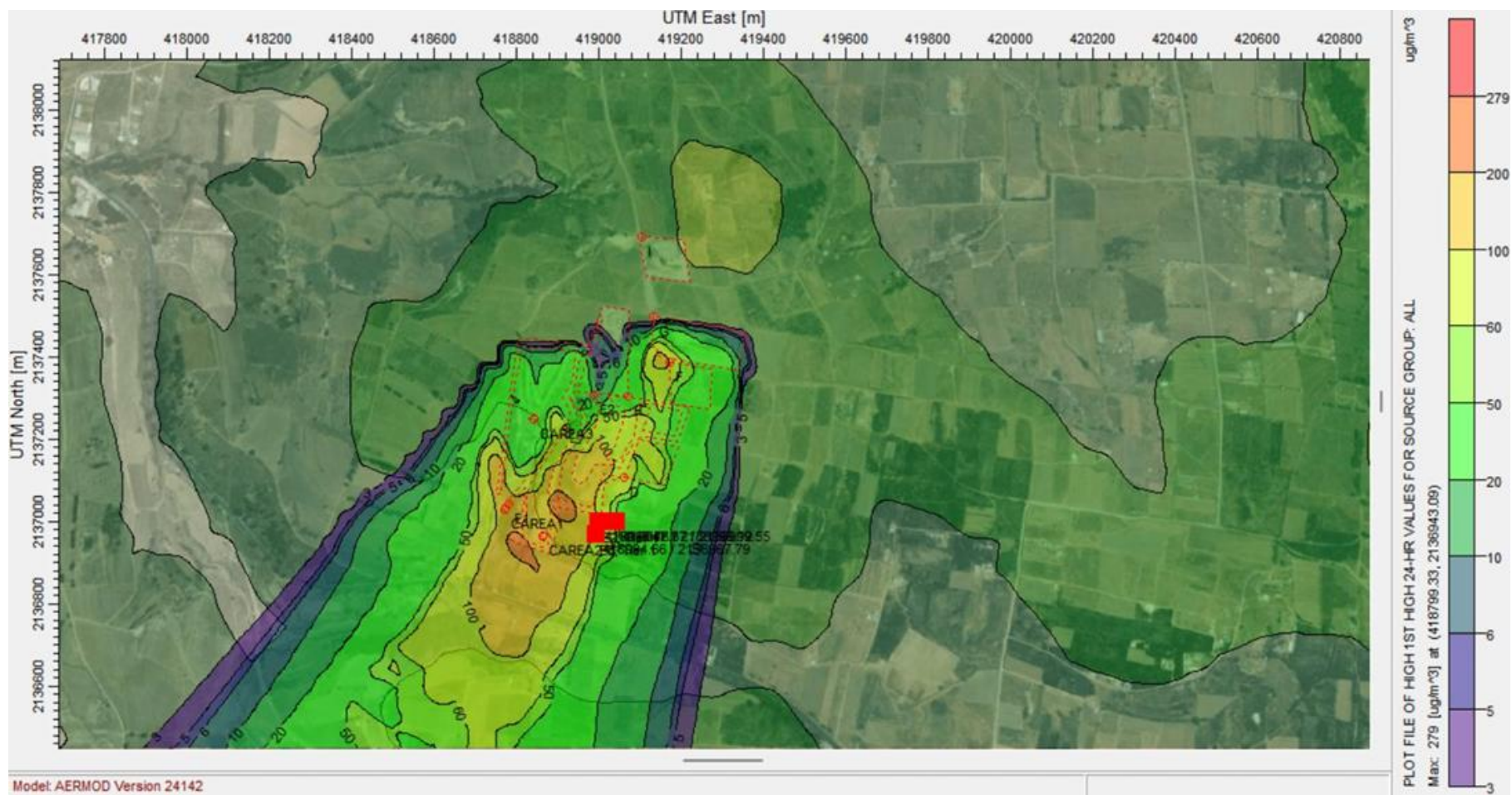


Figura 3.17 Modelado de la concentración de PM₁₀ durante 24 h

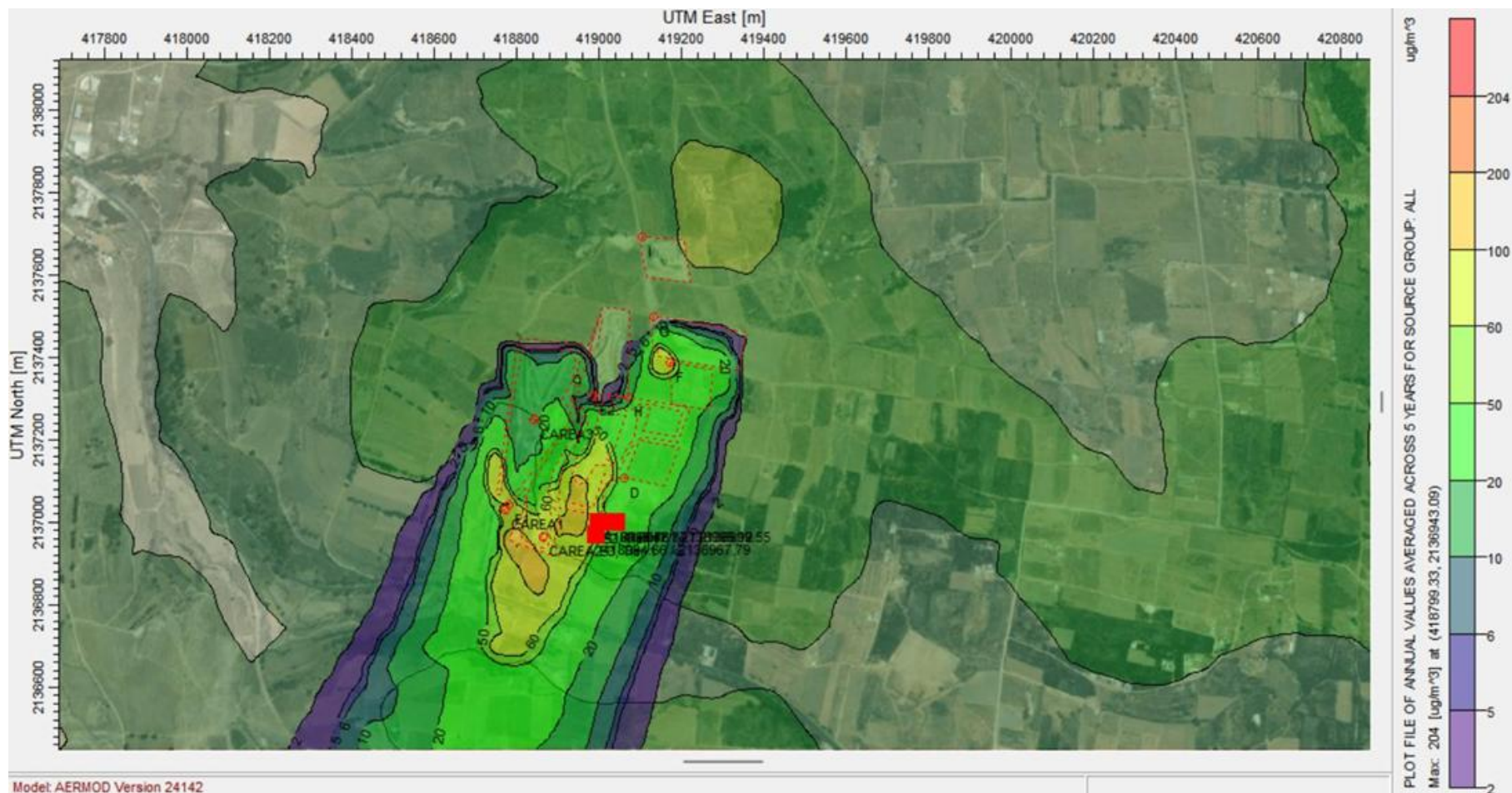


Figura 3.18 Modelado de la concentración de PM₁₀ durante 1 año

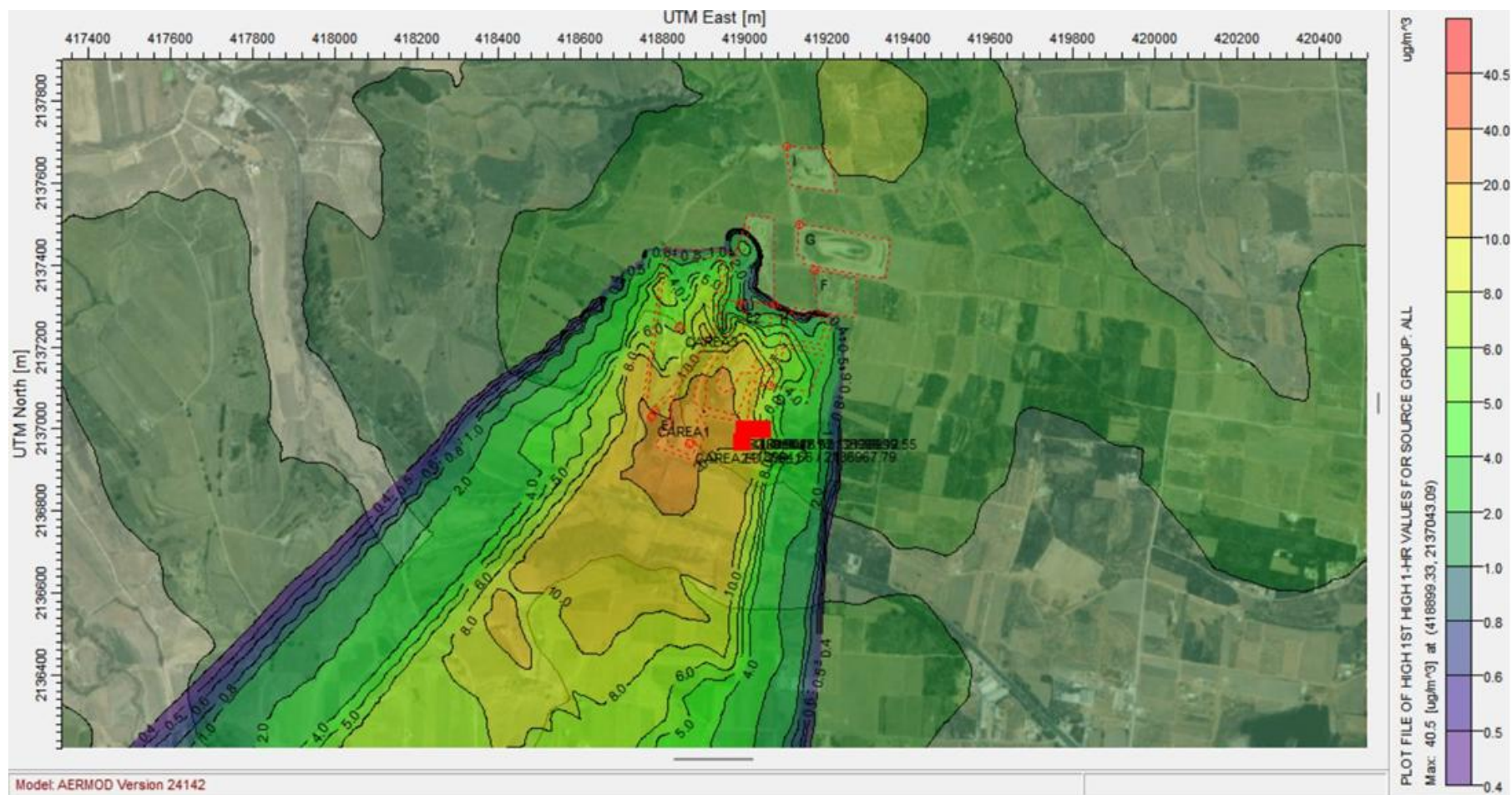


Figura 3.19 Modelado de la concentración de $PM_{2.5}$ durante 1 h

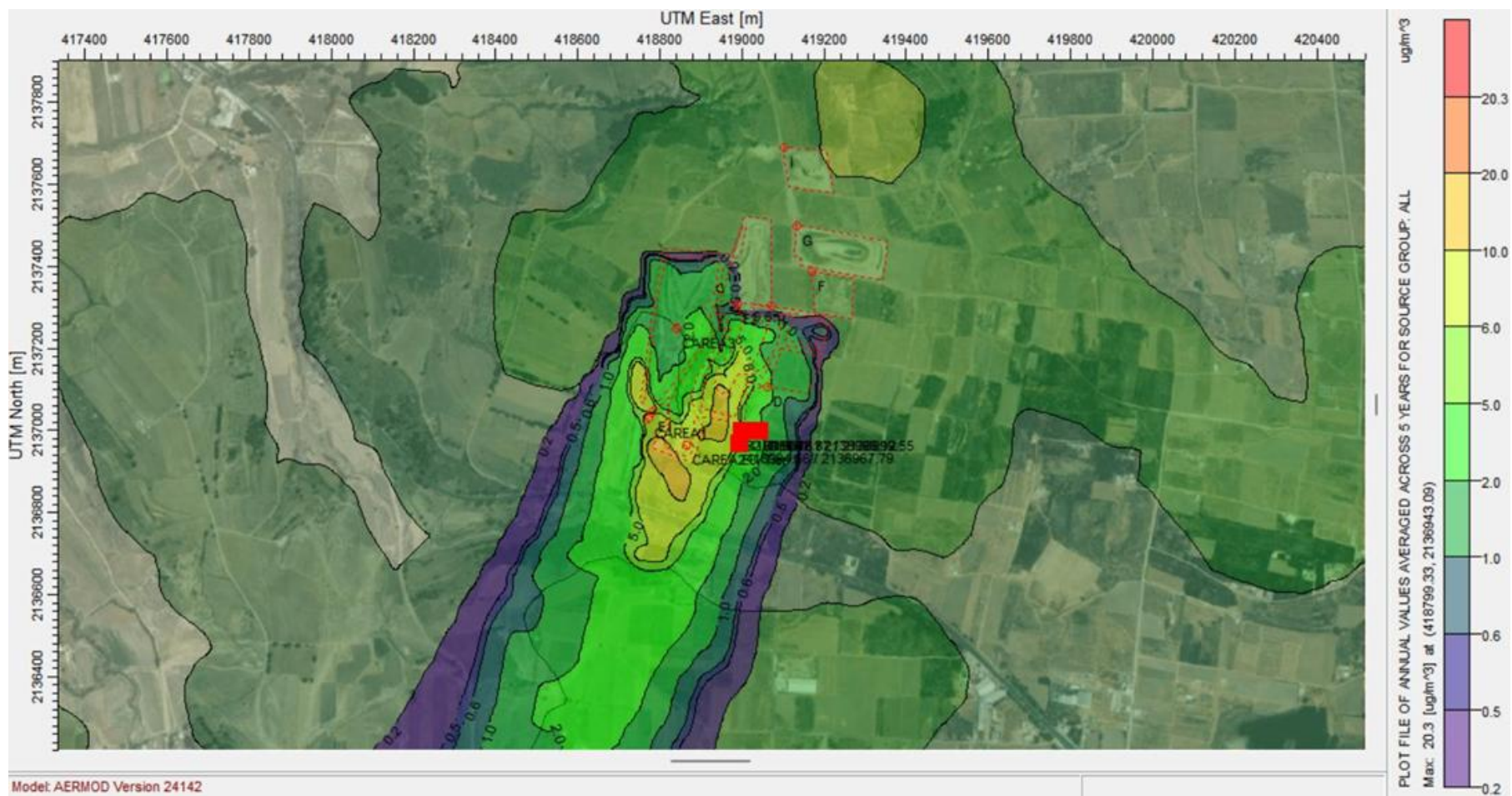
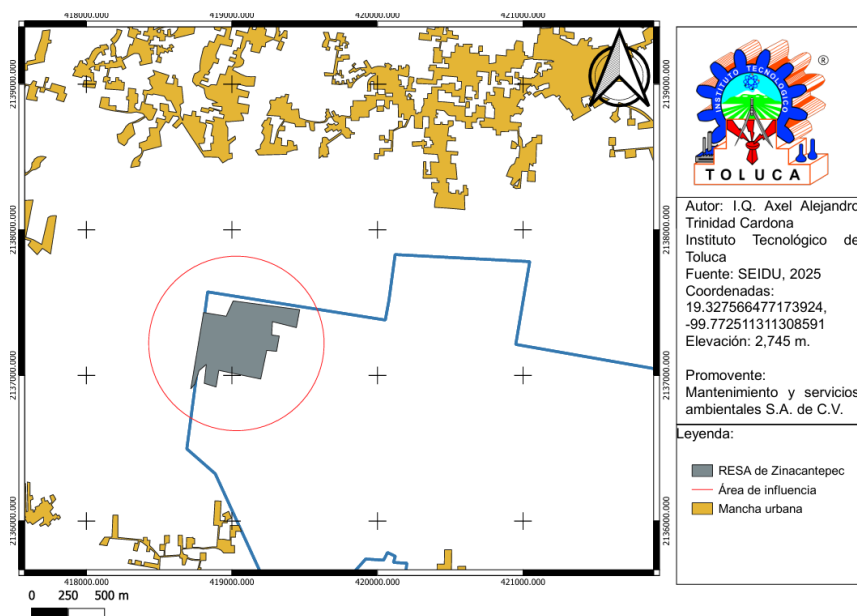


Figura 3.21 Modelado de la concentración de PM_{2.5} durante 1 año

Al comparar estos resultados con los obtenidos por Peter y Nagendra (2021), quienes modelaron la dispersión de $PM_{2.5}$ en un tiradero a cielo abierto, se observa una variación significativa en los valores máximos registrados durante 1 hora ($247 \mu g/m^3$) y 24 horas ($53.4 \mu g/m^3$). Esta discrepancia sugiere que los RESA, a pesar de su impacto en la generación de PM_{10} , podrían representar una opción más viable para la disposición final de RSU. Esto se debe no solo a su capacidad para minimizar los daños ambientales asociados a los RSU, sino también a su potencial para reducir la generación de partículas finas que representan un mayor riesgo para la salud humana.

3.5 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

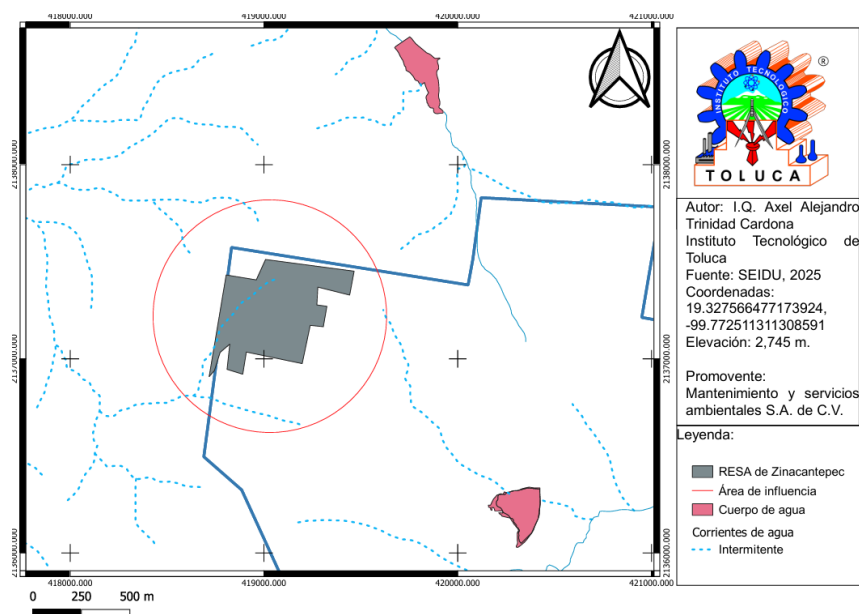
El modelado indica que las concentraciones de PM se mantienen elevadas en el centro del RESA y de allí se dispersan hacia el noreste y suroeste principalmente, donde se aprecian las marchas urbanas más cercanas al RESA (Figura 3.22). Los datos generados por el modelo de dispersión AERMOD indican que las PM_{10} y $PM_{2.5}$ impactan en dichas manchas urbanas; sin embargo, las concentraciones anuales y durante 24 h para dichos contaminantes no superan el límite establecido por la Secretaría de Salud de México (NOM-025-SSA1-2021), por lo que se puede considerar que las poblaciones se encuentran libre de afectaciones provenientes de las $PM_{2.5}$ y PM_{10} .



Fuente: Adaptado de SIGEIA, 2025

Figura 3.22 Manchas urbanas cerca del RESA de Zinacantepec

El modelo de dispersión muestra que las concentraciones de $PM_{2.5}$ y PM_{10} permanecen elevadas de manera anual en las áreas adyacentes a cuerpos de agua y corrientes intermitentes del RESA (Figura 3.23). Este patrón de dispersión sugiere un riesgo significativo de contaminación para estos sistemas hídricos, donde las partículas podrían incorporarse a los mantos acuíferos mediante infiltración o ser transportadas aguas abajo por escorrentía superficial. Estos mecanismos representan una amenaza potencial para la calidad del agua, pudiendo afectar tanto a los ecosistemas acuáticos como a posibles usos humanos del recurso hídrico en la zona.



Fuente: Adaptado de SEGEIA, 2025

Figura 3.23 Cuerpos de agua circundantes al RESA de Zinacantepec

CONCLUSIONES

La caracterización de residuos finos reveló que el 0.17% de estos tienen un diámetro menor a 38 μm , estos pueden incluir tamaños de partícula similares a las PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$. Estas partículas, al resuspenderse, representan un riesgo significativo para la salud de los trabajadores del RESA, ya que pueden ser inhaladas fácilmente y afectar el sistema respiratorio, provocando daños a corto y largo plazo.

Las mediciones realizadas con contadores de partículas indican que las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} superan tanto los límites recomendados por la Organización Mundial de la Salud como los límites máximos permisibles establecidos por la Secretaría de Salud de México. Esto confirma un riesgo potencial para la salud de los trabajadores y la población expuesta.

La concentración de PM_{10} es particularmente alta en el RESA debido a las operaciones diarias que generan partículas gruesas. Además, el suelo de tipo franco arenoso, compuesto principalmente por partículas de arena, favorece la resuspensión de estas partículas durante el tránsito de camiones pesados, incrementando aún más los niveles de PM_{10} .

El modelado y uso del QGIS demuestra que la contaminación por PM en el RESA no se limita al aire, sino que tiene un carácter multidimensional. Además de afectar la calidad del aire en las zonas urbanas aledañas, representando un riesgo para la salud respiratoria de la población y tiene el potencial de contaminar los sistemas hídricos circundantes, lo que amplía su impacto ambiental y social.

RECOMENDACIONES

Dado que el 29.84% de los RSU que llegan al RESA son aprovechables, se recomienda establecer programas de separación, reciclaje y valorización en origen. Esto reduciría no solo el volumen de residuos depositados en el sitio, sino también las emisiones asociadas a su descomposición y manejo, contribuyendo a disminuir las concentraciones de PM.

Debido a las altas concentraciones de PM a las que están expuestos los trabajadores del RESA, es prioritario implementar programas de capacitación sobre los riesgos a la salud asociados a la exposición prolongada. Además, se debe fomentar el uso obligatorio de equipo de protección personal, como mascarillas con filtros de alta eficiencia, y realizar monitoreos periódicos de su salud respiratoria.

Se sugiere llevar a cabo estudios de campo en las zonas urbanas cercanas al RESA para evaluar el impacto de las PM generadas en el sitio. Esto permitirá cuantificar el alcance de las afectaciones en la población y diseñar estrategias de mitigación específicas, como barreras naturales o sistemas de filtración de aire.

Es fundamental profundizar en la investigación sobre la composición de las PM en los RESA. Además de conocer las concentraciones, se recomienda caracterizar las partículas para identificar la presencia de metales pesados y otros contaminantes tóxicos. Esto proporcionará información valiosa para evaluar los riesgos a la salud y al medio ambiente, así como para proponer medidas de control más efectivas.

Para garantizar el cumplimiento normativo, es imperativo implementar medidas de mitigación activa como riego programado en las zonas de tránsito. Estas acciones podrían reducir las emisiones en más de un 80%, situando al proyecto dentro de los parámetros de cumplimiento.

REFERENCIAS

1. Abidin, A., Maziya, F., Susetyo, S., Yoneda, M. y Matsui, Y. (2023). Exposure particulate matter (PM_{2.5}) and health risk assessment on informal workers in landfill site, Indonesia. Elsevier. *Environmental Challenges*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100795>
2. Arciniégas, C. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM₁₀. *Revista luna azul*, 34, 195-213. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-24742012000100012
3. Araújo, I., Costa, D. y de Morales, R. (2014). Identification and characterization of particulate matter concentrations at construction jobsites. *Sustainability*, 6 (11), 7666–7688. <https://doi.org/10.3390/su6117666>
4. Arrieta, A. (2016). Particulate matter dispersion (PM₁₀), with interrelation of topographic and meteorological factors. *Revista ingeniería, investigación y desarrollo*, 16 (2), 43-54. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6096112>
5. Arya, R., Ahlawat, S., Yadav, L., Jangirh, R., Mondal, A., Sharma, S., Gurjar, B., Nemitz, E. y Mandal, T. (2022). Particle Size Distribution from Municipal Solid Waste Burning over National Capital Territory, India. *Environmental Sciences Proceedings*, 19(1), 26. <https://www.mdpi.com/2673-4931/19/1/26>
6. Borbet, T., Gladson, L. y Cromar, K. (2018). Assessing air quality index awareness and use in Mexico City. *BMC Public health* 18, 538. <https://doi.org/10.1186/s12889-018-5418-5>
7. Böhme, G. (2021). Atmosphere. Online encyclopedia philosophy of nature / Online lexikon naturphilosophie. doi:10.11588/oeprn.2021.1.80607.
8. Brusseau, M., Matthias, A., Comrie, A. y Musil, S. (2019). Atmospheric Pollution. *Environmental and Pollution Science*, 293–309. doi:10.1016/b978-0-12-814719-1.00017-3
9. Caporale, G., Carmona, N. y Gil, L. (2024). Atmospheric pollution in Chinese cities: Trends and persistence. *Heliyon*, 10, (19). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38211>
10. Chalvatzaki, E., Kopanakis, I., Kontaksakis, M., Glytsos, T., Kalogerakis, N. y Lazaridis, M. (2010) Measurements of particulate matter concentrations at a landfill site (Crete, Greece). *Waste Management*, 30 (11), 2058-2064. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.05.025>

11. Correa, M., Franco, S., Gómez, L., Aguilar, D. y Colorado, H. (2023). Characterization methods of ions and metals in particulate matter pollutants on PM_{2.5} and PM₁₀ samples from several emission sources. *Sustainability*, 15 (5), 4402. <https://doi.org/10.3390/su15054402>
12. Cuellar, F. (2011). Simulación meteorológica y caracterización de material particulado (PM₁₀) en la atmosfera de la zona industrial del Valle de Toluca. Tesis doctoral. Instituto Tecnológico de Toluca.
13. Cuellar, L., Palomá, M., Puentes, N. y Polania, A. (2022). Determination of the level of contamination by total suspended particles of mineral processing industries in the municipality of Palermo, Huila, Colombia. *Revista ingeniería y región* 27, 35-47. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8865455.pdf>
14. Díaz, L., Buenrostro, O., Mañón, M. y Hernández, M. (2017). Emisión de gases de efecto invernadero en dos sitios de disposición final de residuos sólidos urbanos en México. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 18 (2), 149-159. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432017000200149
15. EPA. Environmental Protection Agency. (2025a). Air quality dispersion modeling – Preferred and recommended models. <https://www.epa.gov/scram/air-quality-dispersion-modeling-preferred-and-recommended-models>
16. EPA. Environmental Protection Agency. (2025b). AP – 42: Compilation of air emissions factors from stationary sources. Air emissions factors and quantification. <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors-stationary-sources>
17. Escamilla, P., Ángeles, L., Pérez, F. y Rivera, G. (2024). Los residuos sólidos urbanos, afectaciones ambientales y sociales: una revisión crítica. *M + A, revista electrónica de medioambiente*, 25 (1), 29-51. <https://www.ucm.es/iuca/file/articulo-3-m-a-2024-1?ver>
18. Fang, G., Wu, Y., Wen, C., Lee, W. y Chang, S. (2006). Influence of meteorological parameters on particulates and atmospheric pollutants at taichung harbor sampling site. *Environmental monitoring and assessment*, 128 (1-3), 259-275. <https://doi.org/10.1007/s10661-006-9311-9>
19. FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations (2009). Guía para la descripción de suelos. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b54d0348-dfce-413c-bd5d-142b3a14a049/content>

20. Gabriels, D. y Lobo, D. (2006). Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo. *Venesuelos*, 14 (1), 37-48. http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/view/982
21. Giosanu, D., Marian, M. y Zaharia, A. (2021). The influence of meteorological topographical parameters on the dispersion of PM₁₀ and co pollutants. *Current trends in natural sciences*, 10 (19), 92-98. <https://doi.org/10.47068/ctns.2021.v10i19.012>
22. Google Earth. (2024). Google Earth Pro versión 7.1.
23. Hamanaka, R. y Mutlu, G. (2018). Particulate matter air pollution: effects on the cardiovascular system. *Frontiers in endocrinology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fendo.2018.00680>
24. Herrera, J., Rojas, J. y Anchía, D. (2016). Generation rates and characterization of ordinary solid waste in four municipalities of the metropolitan area Costa Rica. *Revista Geográfica de América Central*, vol. 2, núm. 57, pp. 235-260, 2016. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15359/rgac.57-2.9>
25. Hoefs, J. y Harmon, R. (2022). The earth's atmosphere – A stable isotope perspective and review. *Elsevier. Applied geochemistry*, 143. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105355>.
26. Holman, C. (1999). Sources of air pollution. Academic press. Air pollution and health. <https://doi.org/10.1016/B978-012352335-8/50083-1>.
27. Hoorweg, D. y Bhada, P. 2012. What a waste: A global review of solid waste management. urban development series; knowledge papers no. 15. © World Bank, Washington, DC. <https://hdl.handle.net/10986/17388>
28. INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2025). Mapa digital de México. <https://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjZlZjMyMDA4LGxvbjotMTAyLjE0NTY1LHo6MSxsOmMxMTFzZXJ2aWNpb3N8dGMxMTFzZXJ2aWNpb3M=>
29. Jawwad, M., Murti, R. y Citrasari, Nita. (2023). Analisis dan model dispersi kualitas udara di tpa Klotok Kediri. *Jurnal pengendalian pencemaran lingkungan*, 5 (1), 31-37. <https://doi.org/10.35970/jppl.v5i1.1786>
30. Kenneth, W. y Cecil, F. (1999). "Contaminación del aire, origen y control" Editorial Limusa, 6ª edición, México, D.F.
31. Kougias, P. y Angelidaki, I. (2018). Biogas and its opportunities – A review. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 12, (3). <https://doi.org/10.1007/s11783-018-1037-8>

32. Lazo, P., Curé, M. y Gaete, H. (2006). Modelación de la dispersión de anhídrido sulfuroso en la columna de Puchuncaví utilizando el programa ISC3. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 14 (3), 229-237. <https://www.scielo.cl/pdf/ingeniare/v14n3/art06.pdf>
33. Legarreta, A., Corral, A., Delgado, M., Torres, J. y Flores, J. (2015). Material particulado y metales pesados en aire en ciudades mexicanas. *Cultura científica y tecnológica, medio ambiente*, 12 (56), 234-245. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7132240>
34. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos. DOF. Diario Oficial de la Federación. (2023). <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPGIR.pdf>
35. Márquez, L. y Sánchez, J. (2014). Phytotoxic Effect of Landfill and Leachate Pollution Indexes on Germination and Seedling of *Phaseolus vulgaris* L. *Journal of the selva andina research society*, 5 (1), 13-23. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2072-92942014000100003
36. Méndez, J., Pinto, L., Galvis, B. y Pachón, J. (2017). Estimation of resuspended dust emission factors before, during and after road paving process in Bogota. *Ciencia e ingeniería neogranadina*, 27 (1), 43-60. <https://doi.org/10.18359/rcin.1797>
37. Mora, J., Sibaja, J. y Borbón, H. (2020). Natural and anthropogenic sources of atmospheric pollution: state of the art of its impact on the physicochemical properties of rain water and fog water. *Tecnología en Marcha*, 34 (1), 92-103. <https://doi.org/10.18845/tm.v34i1.4806>
38. Negral, L., Suárez, B., Zapico, E., Fernández, Y., Megido, L., Moreno, J., Marañón, E. y Castrillón, L. (2020). Anthropogenic and meteorological influences on PM₁₀ metal/semi-metal concentrations: Implications for human health. Elsevier. *Chemosphere*, 243. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125347>
39. NMX-AA-015-1985. DOF. Diario Oficial de la Federación (1985a). Protección al ambiente - contaminación del suelo - residuos sólidos municipales - muestreo - método de cuarteo. <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFs/NMX-AA-015-1985.pdf>
40. NMX-AA-016-1984. DOF. Diario Oficial de la Federación (1984). Protección al ambiente-contaminación del suelo - residuos sólidos municipales – determinación de humedad. <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/aa/aa016.pdf>
41. NMX-AA-022-1985. DOF. Diario Oficial de la Federación (1985b). Protección al ambiente-contaminación del suelo - residuos sólidos municipales - selección y cuantificación de subproducto.

- <https://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/agenda/DOFs/NMX-AA-022-1985.pdf>
42. NOM-035-ECOL-1993. DOF. Diario Oficial de la Federación. (1993). Establece los métodos de medición para determinar la concentración de partículas suspendidas totales en el aire ambiente y el procedimiento para la calibración de los equipos de medición. <https://faolex.fao.org/docs/pdf/mex50751.pdf>
 43. NOM-083-SEMARNAT-2003. DOF. Diario Oficial de la Federación. (2003). Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y de manejo especial. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=658648&fecha=20/10/2004#gsc.tab=0
 44. NMX-AA-132-SCFI-2016. DOF. Diario Oficial de la Federación. (2016). Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2010/nmx/nmx-aa-132-scfi-2016.pdf>
 45. Öman, C. y Junestedt, C. (2008). Chemical characterization of landfill leachates – 400 parameters and compounds. *Waste Management*, 28 (10), 1876-1891. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.06.018>.
 46. OMS. Organización Mundial de la Salud. (2024). Contaminación del aire ambiente (exterior) y salud. Página Web. [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)
 47. Opara, A., Akaolisa, C., Akakuru, C., Nkwoda, A., Ibe, F., Verla, A. y Chukwuemeka, I. (2021). Particulate matter exposure and non-cancerous inhalation health risk assessment of major dumpsites of Owerri metropolis, Nigeria. *Environmental analysis health and toxicology*, 36 (4). <https://doi.org/10.5620/eaht.2021025>
 48. Pénard, C. y Annesi, I. (2004). Air pollution: from sources of emissions to health effects. *Breathe*. 1 (2), 108-119. DOI: 10.1183/18106838.0102.108
 49. Pérez, H., Lunagómez, M. y Acosta, LI. (2010). Analysis of total suspended particles (TSP) and breathable fraction-particulate matter (PM₁₀) in Cunduacan, Tabasco. *Universidad y ciencia*, 26 (2), 151-162. www.redalyc.org/articulo.oa?id=15416232003
 50. Pérez, I., García, M., Sánchez, M., Pardo, N. y Fernández, B. (2020). Key points in air pollution meteorology. *International journal of environmental research and public health*, 17 (22), 8349. <https://doi.org/10.3390/ijerph17228349>

51. Peter, A. y Nagendra, S. (2021). Dynamics of PM_{2.5} pollution in the vicinity of the old municipal waste dumpsite. *Environmental monitoring and assessment*, 193 (5). <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09052-8>
52. Polichetti, G., Cocco, S., Spinali, A., Trimarco, V. y Nunziata, A. (2009). Effects of particulate matter (PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁) on the cardiovascular system. *Elsevier. Toxicology*, 261 (1-2), 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2009.04.035>
53. Quijano, A. y Orozco, J. (2005). Monitoreo de material particulado-fracción respirable (PM 2.5) en Pamplona (Colombia). *Bistua: Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 3(2), 1-11. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90330201>
54. Quijano, A., Quijano, M. y Meléndez, I. (2015). Cuantificación de los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) en el material particulado PM_{2.5} de una zona residencial de pamplona, Colombia. *Revista Luna Azul*, (40), 85-101. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=321733015007>
55. RAMA. (Red Automática de Monitoreo Atmosférico. (2024). Normas de calidad del aire. Gobierno del Estado de México. Secretaria del medio ambiente y desarrollo sostenible. https://rama.edomex.gob.mx/normas_calidad
56. Ramos, A. y Benítez, D. (2017). Modelamiento de material particulado emitidos por coquización. Municipio de Samaca, Boyacá. *Revista Logos, Ciencia y Tecnología*, 8 (2), 159-169. <https://www.redalyc.org/journal/5177/517752177014/html/>
57. Ramos, S., Carrera, J. y Magaña, E. (2016). Taller de calidad del aire. Universidad autónoma de Tabasco. <http://www.riat.ujat.mx/hablandoal aire/tutoriales/TallerDeCalidad DelAire.pdf>
58. Ramadan, B., Budihardjo, M., Syafrudin, Huboyo, H. y Sari, S. (2025). Analysis of particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) emissions from Jatibarang landfill: implications for air quality and health. *IOP Conference series: Earth and Environmental Science* 1447 012033. doi:10.1088/1755-1315/1477/1/012033
59. Raza, S., Hafeez, S., Ali, Z. Nasir, Z., Butt, M., Saleem, I., Wu, J., Chen, Z. y Xu, Y. (2021). An assessment of air quality within facilities of municipal solid waste management (MSWM) sites in Lahore, Pakistan. *Processes*, 9 (9), 1604. <https://doi.org/10.3390/pr9091604>
60. Rim-Rukeh, A. (2014). An assessment of the contribution of municipal solid waste dump sites fire to atmospheric pollution. *Scientific research. Open journal of air pollution*, 3, 53-60. <http://dx.doi.org/10.4236/ojap.2014.33006>

61. Ruoso, A., Nora, M., Mairesse, J. y Duarte, J. (2022). The impact of landfill operation factors on improving biogas generation in Brazil. Elsevier. *Renewable and sustainable energy reviews*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111868>
62. Saldaña, C., Hernández, I., Messina, S. y Pérez, J. (2013). Caracterización física de los residuos sólidos urbanos y el valor agregado de los materiales recuperables en el vertedero el Iztete, de Tepic-Nayarit, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 29 (3), 25-32. <http://dspace.uan.mx:8080/jspui/handle/123456789/720>
63. Saxena, P. y Sonwani, S. (2019). Criteria air pollutants and their impact on environmental health. Springer Nature Singapore Pte Ltd. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-9992-3>
64. Scientec Software. (2021). Software Científico y Técnico. AERMOD View. Addlink Software Científico, S.L. Página Web. <https://www.scientec.com.mx/aermod-view/>
65. Shankar, K. (2007). Source estimation methods for atmospheric dispersion. Elsevier. *Atmospheric environment*, 41 (33), 6964-6973. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.04.064>
66. Silva, A. y Godoy, G. (2016). Modelado de la dispersión de material particulado en la Ciudad de los Ángeles (Chile) a partir de las estufas a leña en el periodo de invierno usando AERMOD. *Obras y proyectos* 20, 44-54. [//www.scielo.cl/pdf/oyp/n20/art04.pdf](http://www.scielo.cl/pdf/oyp/n20/art04.pdf)
67. Simões, S., Andrade, J., Martins, M. y Pinheiro, C. (2015). An overview of particulate matter measurement instruments. *Atmosphere* 2015, 6 (9), 1327-1345. <https://doi.org/10.3390/atmos6091327>
68. Sundari, T., Samra, B. y Basri, A. (2020). The use of wind rose to improve the quality of site analysis. IOP publishing. *International conference on environmental and technology*, 469, 10-11. doi:10.1088/1755-1315/469/1/012017
69. Teng, C., Zhou, K., Peng, C. y Chen, W. (2021). Characterization and treatment of landfill leachate: a review. Elsevier. *Water research*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117525>
70. Tittarelli, A., Borgini, A., Bertoldi, M., De Saeger, E., Ruprecht, A., Stefanoni, R., Tagliabue, G., Contiero, P. y Crosignani, P. (2008). Estimation of particle mass concentration in ambient air using a particle counter. *Atmospheric Environment*, 42(36), 8543–8548. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.056>
71. Trejo, R. (2006). El IMECA: Indicador del grado de contaminación de la atmósfera. *Conciencia tecnológica*, 31, 50-53. <https://www.redalyc.org/pdf/944/94403111.pdf>

72. Vidarte, A. y Colmenares, M. (2020). Zero Waste. Urban solid waste management in Mexico. *Revista iberoamericana de las ciencias sociales y humanísticas*, 9 (18), 130-150. <https://doi.org/10.23913/ricsh.v9i18.217>
73. Wark, K. y Warner, C. (2006). Contaminación del aire. Origen y control. Universidad de Purdue. Editorial Limusa S.A. de C.V.
74. Xue, L., Li, Y., Peppers, J., Wan, C., Kado, N., Green, P., Young, T. y Kleeman, M. (2018). Ultrafine particle emissions from natural gas, biogas, and biomethane combustion. *Environmental science and technology*. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04170>

ANEXOS

ANEXO A. CONSTANTES PARA EL CÁLCULO DE FACTOR DE EMISIÓN

Constantes para k, a y b para la ecuación 2.1

Tabla A1 Constantes para ecuaciones

Constante	PM _{2.5}	PM ₁₀
k (kg/VKT)	0.15	1.5
a	0.9	0.9
b	0.45	0.45

Constantes para k en la ecuación 2.4

Tabla A2 Multiplicador de tamaño de partícula

Tamaño de partícula	<30 µm	<10 µm	<5 µm	<2.5 µm
Valor	0.74	0.35	0.20	0.053

ANEXO B. CALENDARIO DE MUESTREO

En la Tabla B1 se muestra el calendario para ir a monitorear el PM, además de realizar muestreo y caracterización de RSU en el relleno sanitario.

Tabla B1 Calendario de visita al relleno sanitario (julio)

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
30	1	2	3	4	5
7	8	9	10	11	12
14	15	16	17	18	19
21	22	23	24	25	26
28	29	30	31	1	2

Tabla B2 Calendario de visita al relleno sanitario (agosto)

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
28	29	30	31	1	2
4	5	6	7	8	9
11	12	13	14	15	16
18	19	20	21	22	23
25	26	27	28	29	30

Tabla B3 Calendario de visita al relleno sanitario (septiembre)

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
1	2	3	4	5	6
8	9	10	11	12	13
15	16	17	18	19	20
22	23	24	25	26	27
29	30	1	2	3	4