

“Caracterización de la concentración de material particulado sedimentable en el Parque Industrial Ambato mediante SIG, geoestadística y microscopía”

“Characterization of the concentration of sedimentable particulate matter in the Ambato Industrial Park using GIS, geostatistics and microscopy”

Marlon Enrique Abarca Sigcho ¹[0009-0009-9120-8491], Guido Patricio Santillán Lima ²[0000-0003-0743-9107]

¹⁻² Universidad Nacional de Chimborazo, Ecuador.
marlon.abarca@unach.edu.ec, psantillan@unach.edu.ec,

CITA EN APA:

Abarca Sigcho, M. E., & Santillán Lima, G. P. (2025). Caracterización de la concentración de material particulado sedimentable en el Parque industrial Ambato mediante SIG, geoestadística y microscopía. Technology Rain Journal, 4(2).
<https://doi.org/10.55204/trj.v4i2.e82>

Recibido: 09 de mayo-2025

Aceptado: 16 de julio-2025

Publicado: 23 de julio-2025

Technology Rain Journal
ISSN: 2953-464X



Los contenidos de este artículo están bajo una licencia de Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)
Los autores conservan los derechos morales y patrimoniales de sus obras.

Resumen. El acelerado crecimiento y desarrollo del Parque Industrial de Ambato, Ecuador; ha intensificado los problemas de contaminación atmosférica por material particulado sedimentable (MPS), representando un riesgo ambiental significativo, afectando la salud de trabajadores y población residente de la zona. Ante la escasa información sobre los contaminantes de esta área Industrial, se llevó a cabo el estudio con el fin de caracterizar su concentración y dispersión mediante monitoreo gravimétrico, análisis morfológico con microscopía óptica y electrónica (SEM), y modelado espacial con SIG e interpolación IDW en 34 estaciones, superando en un 64,7% los límites establecidos por la OMS (0,5 mg/cm²/mes), con una muestra fuera del límite nacional TULSMA (1 mg/cm²/mes). Las partículas, mayoritariamente de origen antrópico, mostraron altas concentraciones de silicio, aluminio y otros metales. Se identificaron zonas críticas que requieren la implementación de estrategias efectivas de control ambiental orientadas a minimizar la exposición y prevenir impactos en la salud.

Palabras Clave: Material particulado sedimentable, parque industrial Ambato, contaminación atmosférica, caracterización.

Abstract: The accelerated growth and development of the Industrial Park of Ambato, Ecuador, has intensified the problems of atmospheric pollution by sedimentable particulate matter (MPS) representing a significant environmental risk, affecting the health of workers and residents of the area. Given the scarce information on pollutants in this industrial area, a study was carried out to characterize their concentration and dispersion through gravimetric monitoring, morphological analysis with optical and electron microscopy (SEM), and spatial modeling with GIS and IDW interpolation in 34 stations, exceeding the limits established by the WHO by 64.7%, with a sample outside the national limit (TULSMA). Particulate matter, mostly of anthropogenic origin, showed high concentrations of silica, aluminum and other metals. Critical areas were identified that require the implementation of effective environmental control strategies aimed at minimizing exposure and preventing health impacts.

Keywords: Settled particulate matter, Ambato industrial park, air pollution, characterization.

1. INTRODUCCIÓN

En el marco de los estudios sobre calidad de aire y salud ambiental, la contaminación atmosférica representa una problemática ambiental en expansión que compromete la calidad

del aire tanto como para contextos urbanos e industriales. Bajo este contexto, el material particulado sedimentable (MPS) reconocido como uno de los contaminantes más relevantes debido a su capacidad para arrastrar compuestos tóxicos y su tendencia a sedimentarse en superficies expuestas. Por lo tanto, es necesario evaluar cuidadosamente las consecuencias a corto y largo plazo de la exposición a la contaminación atmosférica para la salud pública, en particular el impacto de las partículas finas que penetran profundamente en las vías respiratorias y representan una amenaza significativa para la salud pública. (OMS, 2024). En 2019 la contaminación atmosférica alcanzó alrededor de 6,7 millones de muertes posicionando la contaminación como la segunda causa más preponderante en ENT en todo el mundo, superada solo por el consumo de tabaco. (OMS, 2024).

En entornos industriales como es el caso de estudio, Parque industrial Ambato, provincia de Tungurahua, Ecuador; la escasa información disponible sobre el análisis de la calidad del aire inhalado en conjunto con el acelerado crecimiento y desarrollo manufacturero de la zona configuran un problema ambiental de gran importancia que requiere atención técnica.

Estudios recientes realizados en el sector Andino ecuatoriano bajo la Metodología de Sistemas de Información Geográfica (SIG), junto al uso de técnicas de interpolación espacial ha facilitado el estudio y la identificación de zonas críticas de concentración y dispersión de material particulado sedimentable (MPS), clasificándolas bajo una categorización en base a la criticidad e intensidad. (Santillán-Lima et al., 2024).

En Ecuador la mayoría de estudios e investigaciones realizadas con enfoque en la contaminación atmosférica y calidad de aire han centrado en los niveles desde ($PM_{2.5}$ hasta PM_{10}) en la provincia de Azuay (Cuenca) y Pichincha (Quito), demostrando la falta de estudios que contemplen el material particulado sedimentable (MPS) en parques industriales trascendentes como el de Ambato por su desarrollo y crecimiento exponencial bajo su ubicación en zonas de mayor transcendencia representando una brecha de información necesaria para la formulación de políticas ambientales que prevengan impactos en la salud de los habitantes de la zona. Un estudio reciente realizado en Quito, ha demostrado que las partículas de material particulado sedimentable contiene elementos antropogénicos y geogénicos derivado de emisiones industriales y vehiculares resaltando la importancia de ampliar la atención y enfoque a otras fracciones de material particulado (Raysoni et al., 2017).

Se debe considerar como punto de partida para el caso de estudio lo mencionado por (Bermeo Acurio, 2016), la ciudad de Ambato tiene una alta concentración de industrias y

está influenciada por la actividad del volcán Tungurahua, por lo cual generan mucha contaminación al medio ambiente y se tiene la necesidad de realizar un monitoreo del MPS.

Parte de la motivación principal para el desarrollo del caso de estudio fue el creciente desarrollo el Parque Industrial de Ambato, seguido de la ausencia de estudios específicos sobre material particulado y la calidad de aire en la zona; varias investigaciones y estudios previos en la misma ciudad han identificado diferencias significativas en la caracterización morfológica entre las estaciones y puntos de muestreo que relacionan las variaciones en factores meteorológicos y las dinámicas locales de actividad. (Bermeo Acurio, 2016). Otros estudios han determinado que el material particulado en entornos industriales impacta de manera directa la salud de trabajadores, evidenciando la necesidad de desarrollar estrategias y políticas ambientales en contexto laborales. (Sánchez Rosero, 2017). Dado este contexto se ha considerado pertinente realizar el caso de estudio para generar información local (Parque Industrial) proponiendo una metodología integrada de 3 enfoques; (trasversal, experimental, campo) combinando (monitoreo gravimétrico, análisis microscópico, modelado SIG) generando así datos técnicos confiables que respalden la formulación de políticas ambientales y estrategias que protejan a la salud ocupacional basadas en la planificación y ordenamiento territorial de la región. A partir de esto, se plante la hipótesis descrita a continuación: si se aplica un modelo de monitoreo geoestadístico basado en Sistemas de Información Geográfica (SIG) en el Parque Industrial de Ambato para analizar el material particulado sedimentable (MPS), es posible identificar zonas críticas de mayor concentración y dispersión del contaminante, facilitando la formulación de medidas de mitigación y control frente al crecimiento y manejo de la gestión ambiental.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La importancia del marco metodológico descansa en proporcionar información sobre la forma en que la se ha desarrollado la investigación y hacer posible su replicabilidad.

El marco metodológico incluye dos partes diferenciadas: los elementos relativos al diseño de la investigación (objeto, tipo de investigación realizada, hipótesis, ámbito del estudio, muestra y tipo de muestreo); y la metodología utilizada (variables y técnicas de investigación, trabajo de campo, protocolos de actuación y tipo de análisis realizados) y plan de análisis, instrumentos utilizados.

La investigación está dirigida al análisis de la calidad de aire en el entorno (Parque Industrial de Ambato), caracterizando la concentración de material particulado. Para ello se adoptó una

metodología integral que combina diferentes estrategias de recolección y análisis de datos, facilitando una evaluación detallada, precisa, en el marco de la contaminación ambiental.

El presente estudio engloba 3 enfoques; (trasversal, experimental, campo) permitiendo la caracterización del fenómeno estudiado, a continuación, se sustenta la validez y autenticidad de los resultados obtenidos.

- **Transversal:** El estudio mantiene un periodo específico y delimitado en el tiempo.
- **Experimental:** Integra técnicas cuantitativas y cualitativas mediante el desarrollo de actividades que parten del monitoreo ambiental, muestreo in situ y el análisis posterior en laboratorio, con el fin de caracterizar y determinar la concentración de material particulado sedimentable (MPS) en el Parque Industrial de Ambato.
- **Campo:** Contempla la instalación de estaciones de monitoreo en puntos estratégicos y colindantes al Parque Industrial, con el propósito de recolectar datos y muestras ambientales.

Para la ubicación y delimitación geográfica del área de estudio se considerarán varios factores, mediante el uso de un sistema de Posicionamiento Global (GPS), que registra con precisión las coordenadas espaciales (x, y, z). de los puntos de muestreo considerando variables relevantes como la calidad de aire, densidad demográfica y poblacional, topografía del terreno, tipo de emisión y la distribución espacial de fuentes emisoras de material particulado sedimentable (MPS). Las muestras obtenidas en campo a través de las estaciones instaladas son necesarias para corroborar y sustentar el desarrollo de los mapas en etapas posteriores del análisis (Carrasco Baquero et al., 2025).

En el Parque Industrial de la ciudad de Ambato, provincia de Tungurahua, Ecuador, Figura 1 se implementarán los puntos de monitoreo distribuidos estratégicamente, priorizando zonas que poseen mayor densidad y actividad industrial con el objetivo de asegurar la recolección de muestras representativas y confiables sobre la concentración de material particulado sedimentable. Cada estación estará activa durante un periodo de 30 días cumpliendo los lineamientos y normativas establecidas. En cada punto de análisis se coloca en una caja Petri provista de papel filtro, previamente pesado en laboratorio lo que permitirá posteriormente calcular la carga de MPS depositada en cada estación.

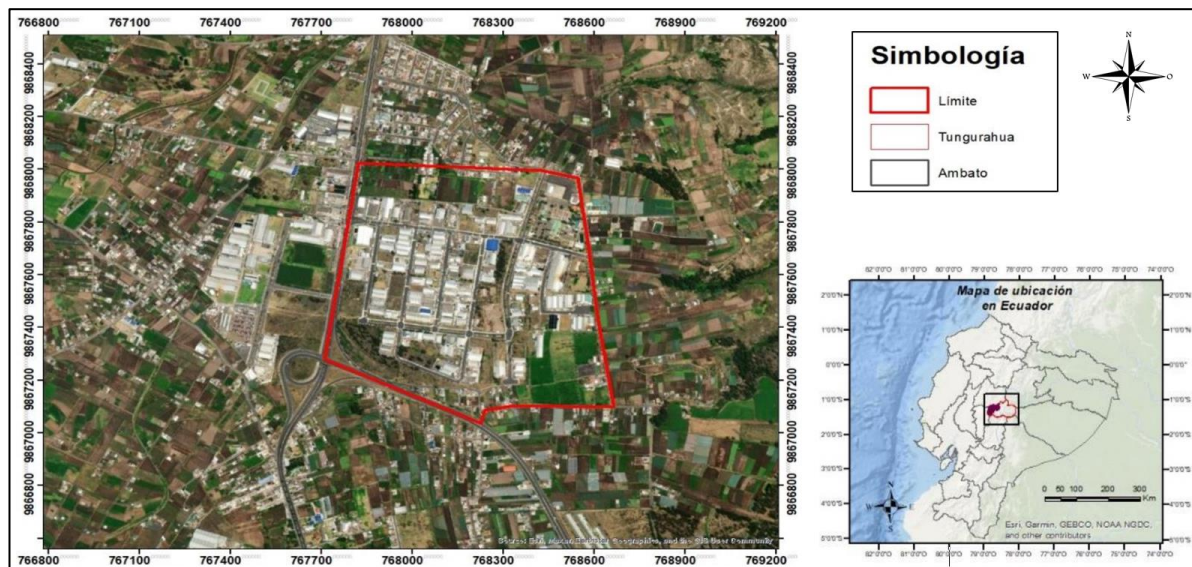


Fig. 1. Delimitación del área de estudio, Parque Industrial Ambato, Tungurahua, Ecuador, mediante SIG - ArcGIS.

A continuación, se presenta la Figura 2 que determina la distribución geoespacial de las 34 estaciones de monitoreo, evidenciando con ellas la delimitación del área de estudio, la disposición estratégica de los puntos de muestreo en análisis con las actividades industriales predominantes y la cobertura territorial considerada para este análisis. Cabe indicar que para su generación se usó la metodología FISHNET, una herramienta que facilita la creación de capas vectoriales en base a variables como son (las coordenadas (x, y, z), velocidad de viento y su dirección) permitiendo sectorizar el área de estudio en cuadrículas, facilitando en lo posterior los procesos de análisis estadístico y la interpolación espacial. Esta técnica estructurada permite el análisis espacial favoreciendo la interpolación estadística de datos para el (MPS) (Zhou et al., 2024).

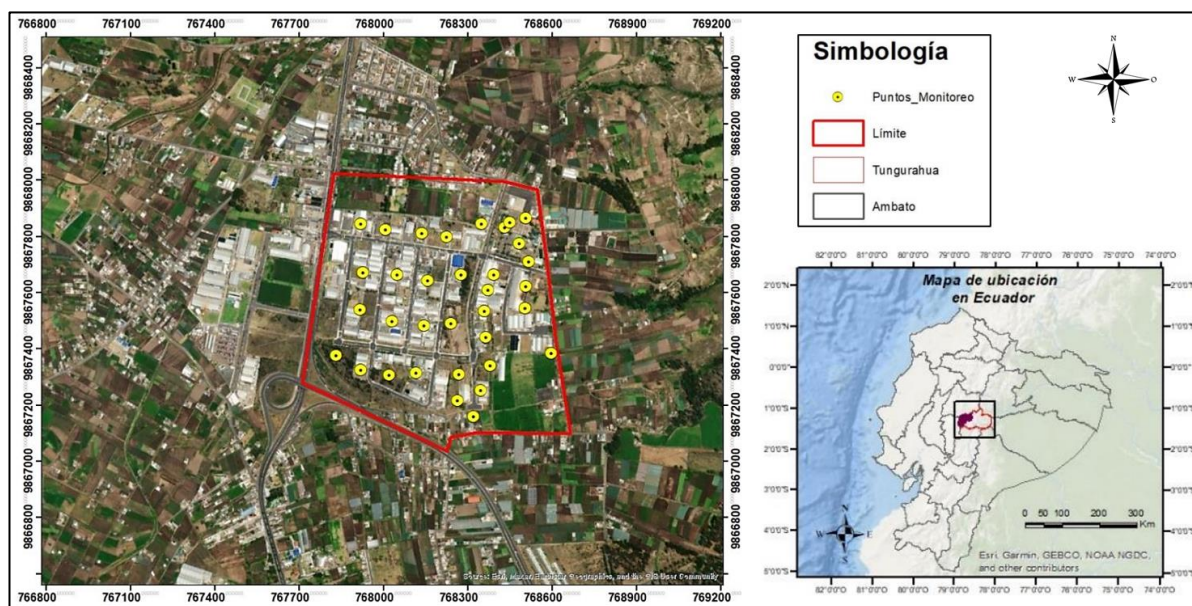


Fig. 2. Parque Industrial de Ambato, distribución de estaciones de monitoreo en el área de estudio, mediante SIG - ArcGIS.

Gracias a esta distribución se definieron 34 estaciones de monitoreo asegurando la cobertura espacial en el área y una distribución uniforme, equidistante entre estaciones de monitoreo. El número de estaciones (E34) fue determinado en función al tamaño del área de estudio y a criterios de densidad espacial mínima enfocados a obtener un muestreo representativo siguiendo las recomendaciones de al menos una estación por cada 8 hectáreas según la EPA.

Análisis Geoestadístico

Para el análisis de material particulado sedimentable (MPS) en el parque industrial de Ambato se utilizaron datos de velocidad y dirección de viento obtenidos de la estación meteorológica más cercana al lugar, ubicada en el Aeropuerto de Ambato, con base a estos valores y posterior a los 30 días de duración del muestreo se podrá determinar la concentración del contaminante mediante herramientas (SIG), Sistema de Información Geográfica.

Bajo el mismo análisis tomando como referencia lo realizado por (González Espinoza & Sánchez Carrión, 2021) en donde su estudio delimitó el Parque industrial de la ciudad de Cuenca, identificando los sectores y zonas de mayor interés (críticos) (zona de mayor concentración de MPS) lo que refuerza y valida el uso de esta metodología en contextos industriales del país.

Monitoreo de Material Particulado

Para determinar y medir el material particulado (MPS) se utilizó el método gravimétrico, sustentado en el principio de determinación de masa por diferencia; es decir, este procedimiento calcula la variación de peso entre el filtro expuesto al ambiente (peso final) y el filtro previamente acondicionado en laboratorio (peso inicial), en relación con el área de exposición (Araújo & Costa, 2022). Posteriormente el valor obtenido se normalizó al periodo de tiempo estandarizado para el estudio (30 días); obteniendo el resultado en unidades de (mg/cm²/mes) ecuación 1.

Cabe mencionar que la ecuación presentada se fundamenta en la norma (ASTM, 2017) en donde se evidencia un procedimiento sencillo y efectivo para la recolección, medición y caracterización de material particulado sedimentable.

$$MPS = \frac{P_f - P_i}{A} \quad (1)$$

Donde:

MPS: Material particulado sedimentable

P_f: Peso final de la muestra (papel filtro) (mg)

P_i: Peso inicial de la muestra (papel filtro) (mg)

A: Área del papel filtro (área efectiva de exposición) (cm²)

Análisis Morfológico de Material Particulado Sedimentable

Para el análisis y caracterización morfológica de material particulado sedimentable (MPS), se utilizó un microscopio óptico de 100x. Es importante mencionar que las muestras recolectadas en los filtros, provenientes de cada uno de los puntos de las cajas Petri serán adecuadamente tratadas buscando garantizar las condiciones ópticas de observación.

A manera comparativa con el estudio realizado por “CITA”, en Brahmaputra en donde el análisis morfológico sirvió para diferenciar el origen de las partículas (biogénico, geogénico, antrópico) pues se observaba distintos tipos de estructuras cristalinas (con bordes afilados, esféricas) producto de material arcilloso y hollín propio de la zona; por lo tanto, este método es aplicable al caso de estudio presentado ya que permite identificar visualmente fuentes directas de contaminación y su impacto con la comunidad. (Bora et al., 2021).

Interpolación con la técnica de Distancia Inversa Ponderada (IDW)

Para realizar un análisis de estimación espacial de la concentración de material particulado sedimentable (MPS), se utilizó el método de interpolación por ponderación inversa a la distancia (IDW). La técnica se basa en la influencia que tienen los valores de puntos cercanos sobre el valor desconocido que aquellos más distantes; la técnica se expresa bajo la siguiente ecuación 2.

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(S_i) \quad (2)$$

Donde:

$Z(S_0)$: Valor estimado del MPS en el punto no muestreado S_0 .

$Z(S_i)$: Valor conocido del MPS en el punto muestreado S_i .

λ_i : Peso asignado al valor $Z(S_i)$, calculado de forma inversamente proporcional a la distancia entre S_0 y S_i .

n: Número total de observaciones utilizadas para la estimación.

Este procedimiento busca garantizar que los valores más cercanos (dato real) al punto de estimación tengan mayor peso, minimizando el error de estimación y de esta manera generando un modelo continuo del comportamiento espacial del contaminante. (Choi & Chong, 2022).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Área de estudio y distribución de puntos de muestreo

El presente estudio forma parte de un análisis orientado a la determinación del material particulado sedimentable (MPS), correlacionando las diferentes actividades industriales

desarrolladas en el área de análisis (Parque Industrial Ambato), siendo un sector estratégico puesto que alberga actividades de almacenamiento, manufactureras, de servicios inmobiliarios, considerada como un punto logístico importante para el sector empresarial de la región.

Las emisiones (polvo, aserrín, humo) provenientes de las diversas actividades productivas, generan material particulado sedimentable afectando de manera directa a las zonas cercanas. Con el propósito de cuantificar la concentración se han establecido 34 estaciones fijas que están posicionadas de manera estratégica y uniforme bajo criterios técnicos de distribución y representatividad espacial.

Para la toma de muestras se utilizó papel filtro de 8,4 cm de diámetro lo que corresponde a un área efectiva de 55,41 cm². Las coordenadas geográficas de cada punto, junto a los valores de concentración obtenidos de las estaciones de muestreo se presentan detalladamente en la tabla 1 para un periodo de tiempo en análisis de 30 días, comprendidos del 1 al 30 de marzo de 2025.

Luego de realizar el análisis para las 34 estaciones de monitoreo se identificó el valor más alto, siendo el de la estación E32 con (1,2435/cm²/mes) en contraste con el más bajo siendo el de la estación 5 con una concentración de (0,3736/cm²/mes).

Tabla 1. Concentración de MPS para cada estación de muestreo en función de sus coordenadas, peso inicial y final.

Estación de monitoreo	Coordenadas geográficas		Peso inicial (mg)	Peso final (mg)	Concentración (mg/cm ² /mes)
E1	768505	9867865	424	447,9	0,4313
E2	768516	9867711	420	455,2	0,6353
E3	768432	9867831	425	455,3	0,5468
E4	767919	9867844	421	444,7	0,4277
E5	768006	9867825	420	440,7	0,3736
E6	768136	9867812	423	450,7	0,4999
E7	768225	9867798	425	448,7	0,4277
E8	768597	9867385	419	470,6	0,9312
E9	768349	9867845	422	475,5	0,9655
E10	768449	9867849	420	464,8	0,8085
E11	768483	9867774	421	445,5	0,4422
E12	768507	9867623	419	451,3	0,5829
E13	768503	9867544	425	458,2	0,5992
E14	768392	9867665	420	448,6	0,5162
E15	768371	9867610	421	450,6	0,5342
E16	768359	9867534	423	462,3	0,7093
E17	768363	9867442	425	460,6	0,6425
E18	768380	9867341	421	463,3	0,7634
E19	768345	9867252	418	438,9	0,3772
E20	768268	9867309	422	465,9	0,7923
E21	768262	9867217	420	445,4	0,4584
E22	768116	9867314	423	449,7	0,4819

E23	768020	9867307	421	441,9	0,3772
E24	767918	9867325	423	458,2	0,6353
E25	768277	9867663	422	451,8	0,5378
E26	768241	9867491	423	454	0,5595
E27	768320	9867159	420	451,2	0,5631
E28	768156	9867644	422	451,7	0,536
E29	768143	9867482	420	466,7	0,8428
E30	768049	9867663	423	450,4	0,4945
E31	768030	9867499	420	444,1	0,4349
E32	767928	9867672	420	488,9	1,2435
E33	767916	9867539	421	455,3	0,619
E34	767832	9867378	422	450,2	0,5089

Los datos obtenidos a partir del análisis y pesaje de cada muestra revelaron una concentración promedio de (0,597 mg/cm²/mes) valor que supera LMP de la Organización Mundial de la Salud (0,50 mg/cm²/mes) pero manteniéndose por debajo del límite contemplado en el Acuerdo Ministerial 097-A siendo de (1 mg/cm²/mes).

Comparación de concentración con el LMP según la OMS, Acuerdo Ministerial 097 A.

Tabla 2. Comparativa entre la concentración obtenida y el límite permisible según la OMS.

Estación de monitoreo	Concentración (mg/cm ² /mes)	Límite permisible según la OMS	Condición
E1	0,4313	0,5	CUMPLE
E2	0,6353	0,5	NO CUMPLE
E3	0,5468	0,5	NO CUMPLE
E4	0,4277	0,5	CUMPLE
E5	0,3736	0,5	CUMPLE
E6	0,4999	0,5	CUMPLE
E7	0,4277	0,5	CUMPLE
E8	0,9312	0,5	NO CUMPLE
E9	0,9655	0,5	NO CUMPLE
E10	0,8085	0,5	NO CUMPLE
E11	0,4422	0,5	CUMPLE
E12	0,5829	0,5	NO CUMPLE
E13	0,5992	0,5	NO CUMPLE
E14	0,5162	0,5	NO CUMPLE
E15	0,5342	0,5	NO CUMPLE
E16	0,7093	0,5	NO CUMPLE
E17	0,6425	0,5	NO CUMPLE
E18	0,7634	0,5	NO CUMPLE
E19	0,3772	0,5	CUMPLE
E20	0,7923	0,5	NO CUMPLE
E21	0,4584	0,5	CUMPLE
E22	0,4819	0,5	CUMPLE
E23	0,3772	0,5	CUMPLE

E24	0,6353	0,5	NO CUMPLE
E25	0,5378	0,5	NO CUMPLE
E26	0,5595	0,5	NO CUMPLE
E27	0,5631	0,5	NO CUMPLE
E28	0,536	0,5	NO CUMPLE
E29	0,8428	0,5	NO CUMPLE
E30	0,4945	0,5	CUMPLE
E31	0,4349	0,5	CUMPLE
E32	1,2435	0,5	NO CUMPLE
E33	0,619	0,5	NO CUMPLE
E34	0,5089	0,5	NO CUMPLE

Del total de 34 estaciones de monitoreo, 12 se encontraron dentro del límite máximo permisible según el establecido por la OMS, mientras que el 64,7% (22 estaciones) mantuvieron un valor que supera el LMP. La estación E32 registró el valor más alto, superando los límites de la OMS y el de la normativa nacional. Este fenómeno está asociado a las actividades industriales desarrolladas en el sector, relacionadas con procesos de pintura, metalmecánica y aserraderos.

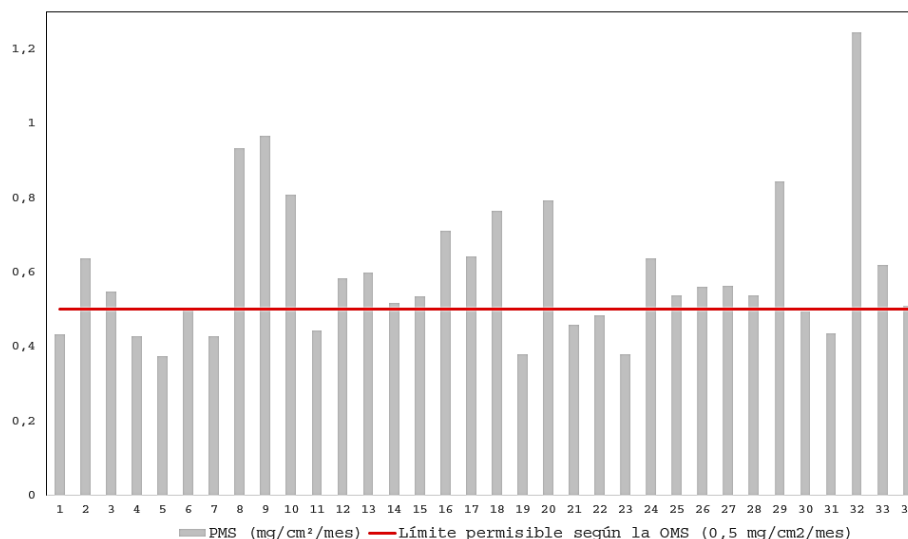


Fig. 3. Comparación de concentración según el LMP de la OMS (estación vs concentración (mg/cm²/mes)).

A continuación, la tabla #, evidencia la comparación entre los valores de concentración para las 34 estaciones y el límite permisible por la normativa nacional de calidad ambiental TULMA.

Tabla 3. Comparativa entre la concentración obtenida y el límite permisible según AM-097/A.

Estación de monitoreo	Concentración (mg/cm²/mes)	Límite permisible según AM 097-A	Condición
E1	0,4313	1	CUMPLE
E2	0,6353	1	CUMPLE

E3	0,5468	1	CUMPLE
E4	0,4277	1	CUMPLE
E5	0,3736	1	CUMPLE
E6	0,4999	1	CUMPLE
E7	0,4277	1	CUMPLE
E8	0,9312	1	CUMPLE
E9	0,9655	1	CUMPLE
E10	0,8085	1	CUMPLE
E11	0,4422	1	CUMPLE
E12	0,5829	1	CUMPLE
E13	0,5992	1	CUMPLE
E14	0,5162	1	CUMPLE
E15	0,5342	1	CUMPLE
E16	0,7093	1	CUMPLE
E17	0,6425	1	CUMPLE
E18	0,7634	1	CUMPLE
E19	0,3772	1	CUMPLE
E20	0,7923	1	CUMPLE
E21	0,4584	1	CUMPLE
E22	0,4819	1	CUMPLE
E23	0,3772	1	CUMPLE
E24	0,6353	1	CUMPLE
E25	0,5378	1	CUMPLE
E26	0,5595	1	CUMPLE
E27	0,5631	1	CUMPLE
E28	0,536	1	CUMPLE
E29	0,8428	1	CUMPLE
E30	0,4945	1	CUMPLE
E31	0,4349	1	CUMPLE
E32	1,2435	1	NO CUMPLE
E33	0,619	1	CUMPLE
E34	0,5089	1	CUMPLE

Como se puede evidenciar según la normativa nacional Tulsma ($1 \text{ mg/cm}^2/\text{mes}$), únicamente la estación E32, supera el valor permitido los 33 restantes cumplen el límite máximo establecido; es importante evidencia el exceso registrado en la estación 32, evidencia focos de contaminación puntuales que requieren control específico.

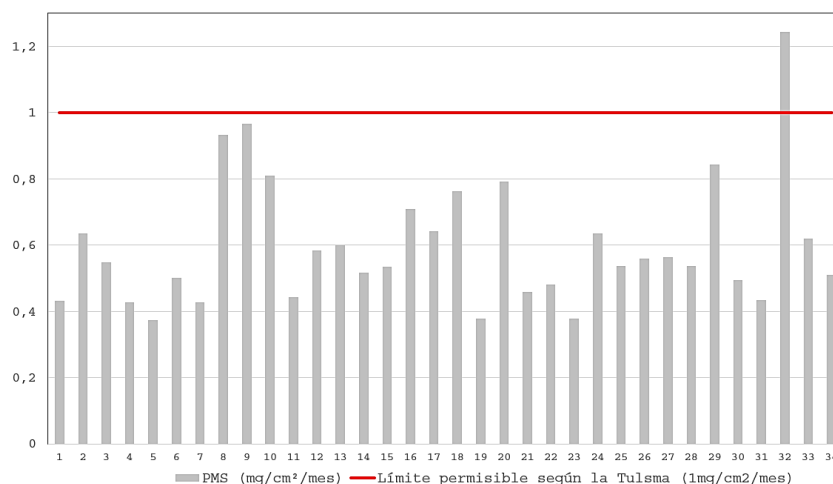


Fig. 4. Comparación de concentración según el LMP de la AM N°097-A (estación vs concentración (mg/cm²/mes)).

A continuación, se presenta un diagrama de caja que compara la distribución de los valores de muestreo para las 34 estaciones en relación con los límites máximos establecidos por la OMS y Tulsma.

Análisis Comparativo de PMS según Normativas OMS y TULSMA

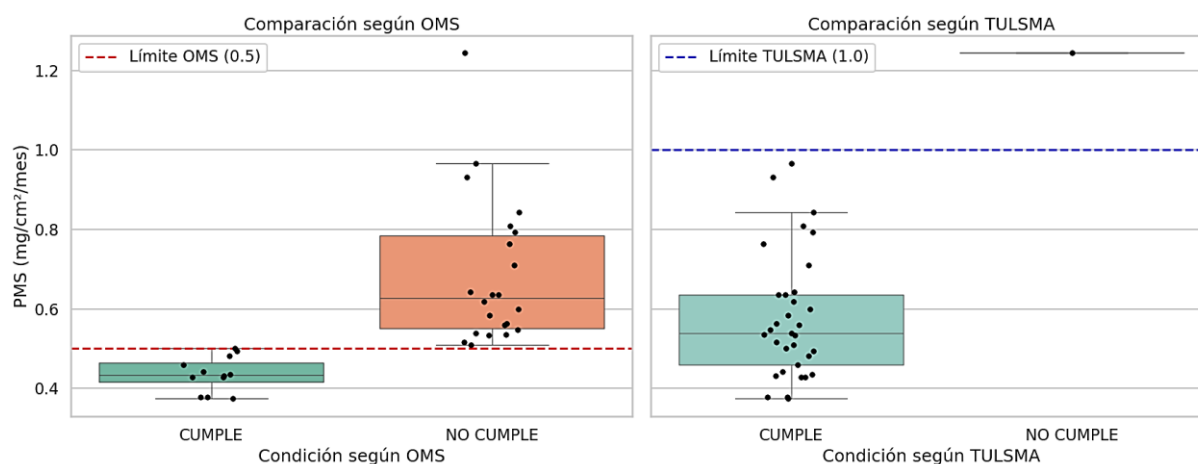


Fig. 5. Análisis comparativo de concentración según los límites AM N°97-A TULSMA y OMS

Caracterización Morfológica de Material Particulado Sedimentable

Con ayuda del microscopio se realiza el análisis morfológico identificando diferentes propiedades físicas que posee el material particulado sedimentable, tamaño, color y forma permitiendo así diferenciar características vinculadas al origen natural o antrópico de las 34 estaciones del parque Industrial de Ambato. Las imágenes evidencian la caracterización, composición química y distribución de partículas, para ello se toma como referencia lo realizado por (Tenorio Castillo, 2019).

Las micrografías obtenidas bajo una resolución de 100x evidenciaron una morfología irregular en su gran mayoría considerando el tamaño como punto de comparación; esto ligado a la ubicación geográfica de cada estación de muestreo. Estas partículas mantienen contornos indefinidos, formas alargadas con tendencia cilíndrica y otras con formas semiesféricas lo que indica

una mezcla de orígenes que combina partículas de origen natural por su coloración verdosa con partículas generadas por procesos industriales, procesos de pintura automotriz. En la figura 5 se puede observar las muestras analizadas para las estaciones E5 y E32.

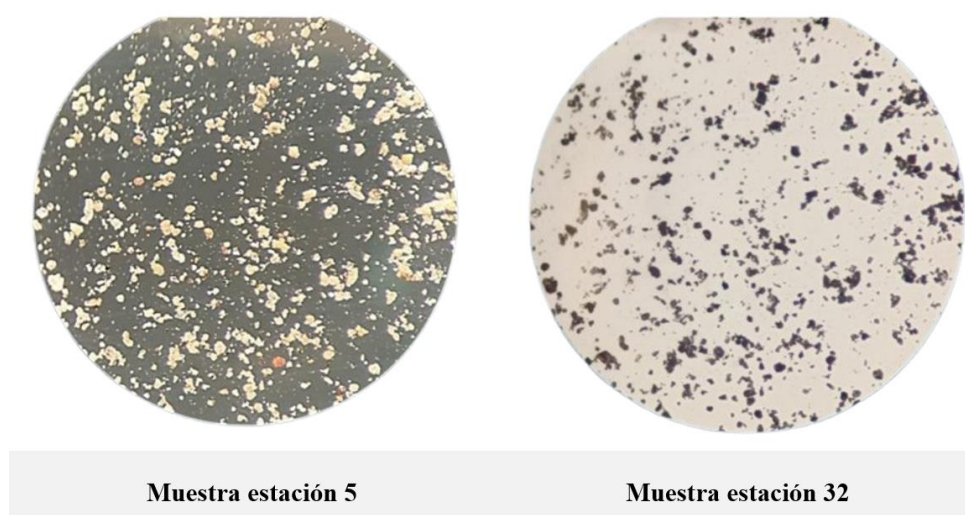


Fig. 6. Comparación Morfológica del Material Particulado: Muestras 5 y 32 mediante Microscopio Óptico.

Caracterización Elemental del Material Particulado mediante Microscopía Electrónica de Barrido

Para determinar la composición química de material particulado sedimentable se analizó mediante microscopia electrónica de barrido (SEM), obteniendo los siguientes resultados. En la muestra estación 5 se observó la presencia de: oxígeno (O), silicio (Si), aluminio (Al), sodio (Na), indio (In), potasio (K), magnesio (Mg) y hierro (Fe); resaltando una alta concentración de oxígeno y silicio. De manera similar, para la muestra estación 32 se registraron elementos como carbono (C), oxígeno (O), hierro (Fe), silicio (Si), aluminio (Al), indio (In), bario (Ba) y magnesio (Mg).

Al comparar ambas estaciones se observa predominancia del silicio, elemento presente en la corteza terrestre en forma de cuarcita que relaciona una roca de tipo metamórfica con un contenido del 90% de cuarzo.

La figura 6 detalla en análisis morfológico de la muestra estación 5, seguido de la figura 7 que identifica el porcentaje de silicio y aluminio en mayor cantidad con un 27,07% y 6,83% respectivamente, marcando al, Na, In y K, en menor concentración junto a otros tipos de metales.

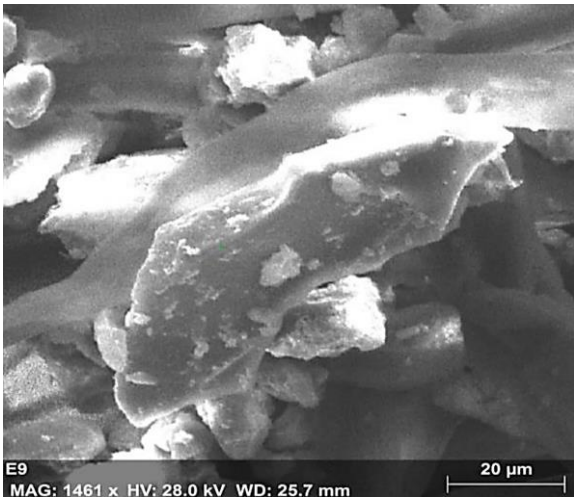


Fig. 7. Análisis de Material Particulado Sedimentable en la Estación 5 mediante SEM (20 µm).

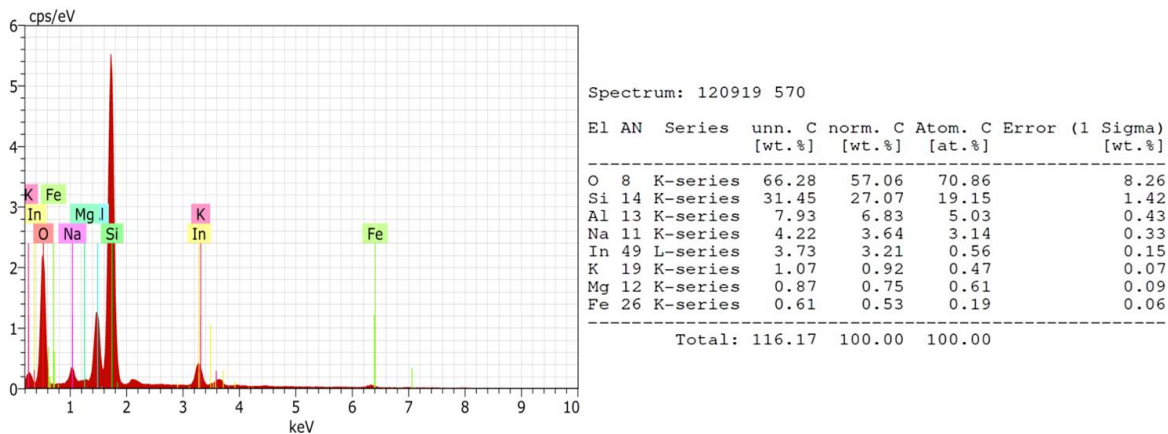


Fig. 8. Reporte de composición Molecular de la estación 5 mediante Microscopia Electrónica de Barrido.

La figura 8 detalla en análisis morfológico de la muestra estación E32, que a diferencia de la estación E5 se identifica en mayor cantidad al hierro y silicio con un 3,50% y 2,38% respectivamente, reflejando un origen de tipo industrial debido a los contaminantes presentes en su entorno; cabe mencionar que los elementos oxígeno y carbono son introducidos por el propio equipo SEM para la caracterización de la muestra.

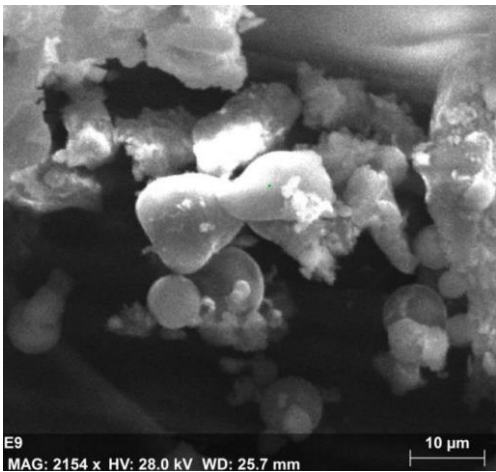


Fig. 9. Análisis de Material Particulado Sedimentable en la Estación 32 mediante SEM (20 µm)

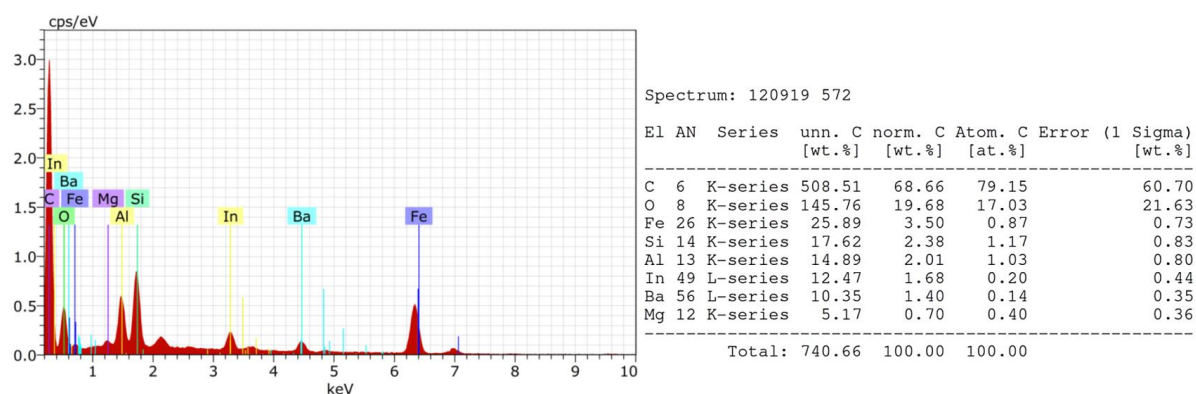


Fig. 10. Reporte de composición Molecular de la estación 32 mediante Microscopia Electrónica de Barrido.

Análisis de Dispersión y Concentración de Material Particulado Sedimentable mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG)

Como etapa final del caso estudio, se desarrolló un mapa de dispersión en relación con la concentración de material particulado sedimentable (MPS) en la zona de análisis, para ello se utilizó coordenadas geográficas (latitud y longitud) en cada estación de muestreo, complementadas con información obtenida de la estación meteorológica del Aeropuerto Ambato.

Con base al periodo de análisis se registró una dirección predominante del viento en sentido (NE) noreste, a una magnitud de 2,49 m/s permitiendo determinar el desplazamiento y comportamiento del material particulado en el área de estudio.

Con el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), se realizó la interpolación de datos obtenidos en el monitoreo permitiendo generar un mapa temático parametrizado con colores que definen las zonas con mayor y menor concentración de material particulado sedimentable. De manera complementaria al caso de estudio, se generó un mapa de dispersión que integra registros de velocidad y dirección del viento, logrando visualizar y determinar el patrón de desplazamiento en el área de estudio. Esta representación figura 10 facilitó el análisis integral de distribución y el comportamiento de material particulado sedimentable en el Parque Industrial Ambato.

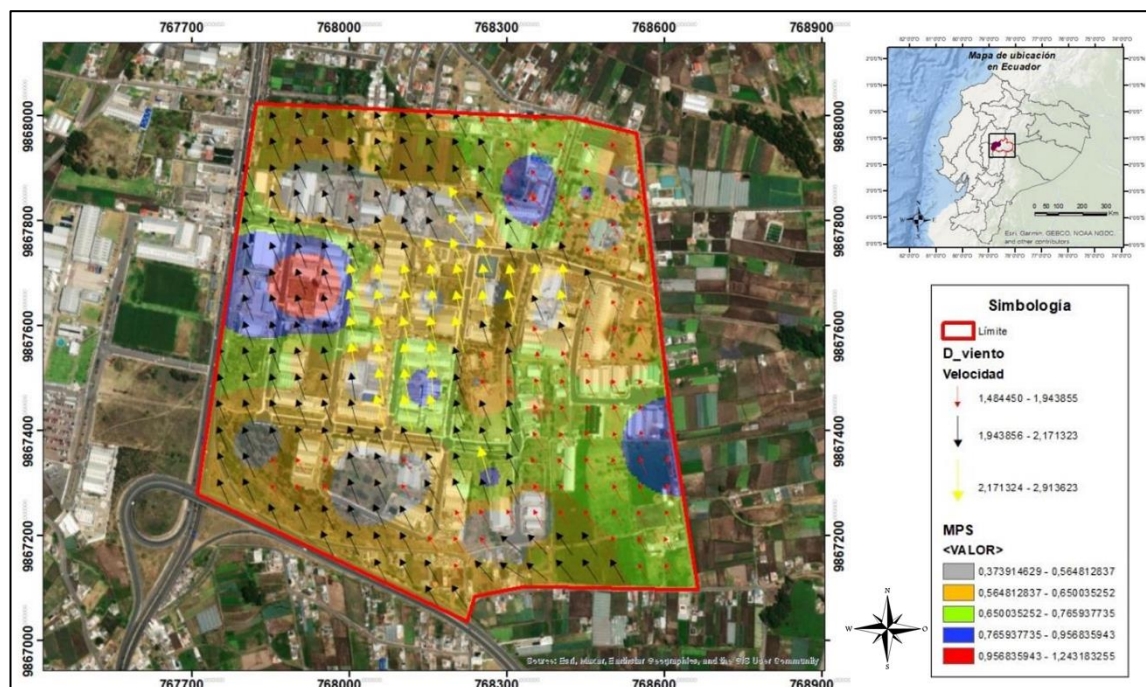


Fig. 11. Distribución Espacial del Material Particulado Sedimentable (MPS) en el Parque Industrial Ambato, mediante SIG - ArcGIS.

La figura 10 enmarca los niveles de concentración mediante una escala de colores, las zonas de menor concentración se identifican con color plomo, ubicadas en zonas con baja actividad industrial. Para los valores entre el rango de (0,564 a 0,65 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$), representados de color naranja situados en zonas que no presentan actividades que generen material particulado, en esta zona existen mecánicas y gasolineras.

El color verde evidencia los valores con niveles medios de concentración que corresponden a actividades de menor emisión como servicios o talleres. Las concentraciones más altas se registraron en los puntos 9 y 32 (color rojo) y alcanzando un máximo de 1,2435 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$ para la estación 32 que asocia su valor a actividades de alta emisión, industrias, calderas, procesamiento de materiales, siendo una zona crítica de exposición para trabajadores, y población más cercana.

Al contrastar con el estudio de (Santillán-Lima et al., 2024) en donde el 95% de las estaciones superaron el límite de la OMS pero ninguna alcanzó el límite nacional evidenciando un escenario con mayor criticidad en al menos un punto (E32) revelando que el parque Industrial de Ambato concentra emisiones con mayor intensidad producto de la actividad manufacturera derivada de los procesos industriales.

Por otro lado, al comparar con el estudio de (Jarrin-Proano, 2022) realizado en el perímetro de la parroquia Lizarzaburu en donde contempla concentraciones promedio entre (0,23 y 0,67 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$) superando por poco los límites de la OMS en ciertas zonas, a diferencia del caso de estudio no se evidenció puntos que superen el límite nacional asociando las emisiones a vehículos y obras civiles.

Al relacionar con el caso de estudio de (Orozco, 2022) realizado en una zona de extracción minera en la ciudad de Riobamba - Ecuador, el muestreo mantiene valores dentro del límite nacional permitido considerando que registra valores críticos en zonas de intensa extracción. En el parque industrial de Ambato las concentraciones fueron localizadas superando incluso el umbral permitido observando una diferencia en la morfología por su origen industrial y minero (natural).

Limitaciones del Estudio y trabajos futuros

Una de las principales limitaciones del caso de estudio es el monitoreo, puesto que se lo ha realizado en un periodo de 30 días, razón por la cual restringe y limita capturar variaciones estacionales en concentración, además que la metodología utilizada no incluye el análisis de partículas en suspensión.

Otra limitante del estudio es el análisis de las fuentes emisores a más detalle, dificultando la identificación precisa de los focos contaminantes. Para futuros trabajos se recomienda ampliar el periodo de monitoreo a un año (incorporando técnicas de espectrometría y caracterización detallada) junto a (variables meteorológicas en tiempo real). También se sugiera un continuo monitoreo de la Estación (E32) desarrollando estrategias de mitigación y control ambiental.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos evidencian una elevada concentración de MPS en zonas críticas, tras el monitoreo de 34 estaciones en el Parque Industrial de Ambato el 64,7% de las estaciones han superado el límite establecido por la OMS ($0,5 \text{ mg/cm}^2/\text{mes}$) manifestando que el 2,9% (estación E32) ha superado el límite nacional TULSMA ($1 \text{ mg/cm}^2/\text{mes}$) manifestando revelando las graves condiciones función de la calidad de aire en zonas donde operan industrias de cal, hormigoneras, y aserraderos, tomando como referencia las estaciones E8, E9, E10, E29, E32.

Se identificaron patrones espaciales de concentración de material particular sedimentable a través del método gravimétrico combinado con el SIG y técnicas de interpolación IDW, facilitando el enfoque y generación de áreas de alta, media y baja exposición facilitando la caracterización y el reconocimiento cualitativo y cuantitativo sobre el impacto industrial en la calidad de aire respirable.

Bajo la caracterización morfológica, microscopía óptica (100x) y análisis SEM, se evidencia que las partículas predominantes son silicio, aluminio, hierro, sodio; bajo una morfología irregular y un tamaño variable entre $2,5 \mu\text{m}$ y $10 \mu\text{m}$ denotando un origen antropogénico relacionado con actividades de mecanizado, combustión, asfalto y partículas de polvo lo que implica un riesgo para la salud respiratoria de trabajadores y población de la zona.

En base al análisis geoestadístico respaldado de los datos de velocidad promedio ($2,49 \text{ m/s}$) y dirección de viento (NE) se generó un mapa de dispersión de MPS considerando que las

concentraciones más altas se localizan en un radio de 100 m aproximadamente (alrededor de los focos emisores), confirmando que la topografía, el viento, la dirección influyen de manera directa en la sedimentación de material particulado y en el impacto sobre el medio ambiente.

El caso de estudio establece una base técnica como línea de partida para el control de MPS en el Parque Industrial de la ciudad de Ambato que se articula con el plan de ordenamiento territorial, proceso de licenciamiento y control ambiental, orientado a mitigar el impacto en las estaciones de mayor influencia (mayor concentración) mediante acciones de control directo.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA En concordancia con la taxonomía establecida internacionalmente para la asignación de créditos a autores de artículos científicos (<https://credit.niso.org/>). Los autores declaran sus contribuciones en la siguiente matriz:

	Abarca M.	Santillan P.	
Participar activamente en:			
Conceptualización	X	X	
Análisis formal	X	X	
Adquisición de fondos	X	X	
Investigación	X	X	
Metodología	X	X	
Administración del proyecto	X	X	
Recursos	X	X	
Redacción –borrador original	X	X	
Redacción –revisión y edición	X	X	
La discusión de los resultados	X	X	
Revisión y aprobación de la versión final del trabajo.	X	X	

REFERENCIAS

- Araújo, I. P. S., & Costa, D. B. (2022). Measurement and Monitoring of Particulate Matter in Construction Sites: Guidelines for Gravimetric Approach. *Sustainability*, 14(1), Article 1. <https://doi.org/10.3390/su14010558>
- ASTM. (2017). *Standard Test Method for Collection and Measurement of Dustfall (Settleable Particulate Matter)* ASTM D1739-98R17. <https://doi.org/10.1520/D1739-98R17>
- Bermeo Acurio, A. V. (2016). *Análisis cuantitativo del material particulado sedimentable con variables meteorológicas en 13 estaciones de la ciudad de Ambato*. <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/24079>
- Bora, J., Deka, P., Bhuyan, P., Sarma, K. P., & Hoque, R. R. (2021). Morphology and mineralogy of ambient particulate matter over mid-Brahmaputra Valley: Application of SEM–EDX, XRD, and FTIR techniques. *SN Applied Sciences*, 3(1), 137. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04117-8>
- Carrasco Baquero, J. C., Carrasco López, D. C., Córdova Lliquín, J. D., Guzmán Guaraca, A. C., León Gualán, D. A., Parra León, V. J., & Caballero Serrano, V. L. (2025). Multitemporal Analysis Using Remote Sensing and GIS to Monitor Wetlands Changes and Degradation in the Central Andes of Ecuador (Period 1986–2022). *Resources*, 14(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/resources14040061>

- Choi, K., & Chong, K. (2022). Modified Inverse Distance Weighting Interpolation for Particulate Matter Estimation and Mapping. *Atmosphere*, 13(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/atmos13050846>
- González Espinoza, L. H., & Sánchez Carrión, A. C. (2021). *Determinación de material particulado sedimentable proveniente del Parque Industrial del cantón Cuenca y su influencia en las zonas aledañas*. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/35631>
- OMS. (2024). *Health consequences of air pollution*. <https://www.who.int/news/item/25-06-2024-what-are-health-consequences-of-air-pollution-on-populations>
- Raysoni, A. U., Armijos, R. X., Weigel, M. M., Echanique, P., Racines, M., Pingitore, N. E., & Li, W. W. (2017). *Evaluation of sources and patterns of elemental composition of PM_{2.5} at three low-income neighborhood schools and residences in Quito, Ecuador*. <https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/www.dspace.uce.edu.ec>
- Sánchez Rosero, C. H. (2017). *Material particulado y su incidencia en la salud de los trabajadores en la Empresa de Calzado CM Original*. <http://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/24456>
- Santillán-Lima, P., Llerena, M. R., Santillán-Lima, J., Molina-Granja, F., Caichug-Rivera, D., & Lozada-Yáñez, R. (2024). Assessment of the Concentration of Settleable Particulate Matter Using Geographic Information Systems in the Central Ecuadorian Highlands. *EAI Endorsed Transactions on Scalable Information Systems*, 11(3). https://eudl.eu/doi/10.4108/eetsis.4156?utm_source=chatgpt.com
- Tenorio Castillo, K. V. (2019). *“INCIDENCIA DEL PARQUE INDUSTRIAL DEL CANTÓN ESMERALDAS EN LA CIUDADELA «LA FLORIDA» MEDIANTE EL ANÁLISIS DE MATERIAL PARTICULADO SEDIMENTABLE.”* [bachelorThesis, Universidad Nacional de Chimborazo,2019]. <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/5464>
- Zhou, X., Li, H., Xu, J., & Sun, Q. (2024). Urban Spatial Image Acquisition and Examination Based on Geographic Big Data. *Land*, 13(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/land13060774>