

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
ESCUELA DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PREVIO A LA OBTENCIÓN
DEL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

**EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AIRE AMBIENTE EN LA CANTERA SAN
JOSÉ UBICADO EN EL SECTOR SAN EDUARDO**

KEVIN RAMIRO MORALES ICHAU

TUTORA: MORAIMA CRISTINA MERA AGUAS

IBARRA – ECUADOR

JULIO, 2025

Ibarra, 18 de julio de 2025

CERTIFICACIÓN TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Integración Curricular titulado ***EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE AIRE AMBIENTE EN LA CANTERA SAN JOSÉ UBICADO EN EL SECTOR SAN EDUARDO***, presentado por el estudiante Kevin Ramiro Morales Ichau con cédula de ciudadanía N° 100502784-0, para obtener el Título de Ingeniero Ambiental.

Certifico que el trabajo cumple con todos los parámetros establecidos, mediante el cual el estudiante demuestra el desarrollo de competencias en el campo de conocimiento de su profesión con un nivel de argumentación coherente, para ser sometido a la evaluación por parte de los lectores.

Adicionalmente, se adjunta el certificado de porcentaje de originalidad de TURNITIN.



(f): 

Mgs Moraima Mera

TUTOR DE TRABAJO

C.C.: 1001743721


PÁGINA DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL

El tribunal examinador, aprueba el presente trabajo en nombre de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Ibarra:

(f): 

Mgs. Moraima Mera

C.C. 100174372-1

(f): 

Mgs. Paola Chávez

C.C. 100274409-0

(f): 


MSc. Diego Mejía

C.C.: 100191296-1

ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS

Yo, *Kevin Ramiro Morales Ichau*, declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 165 del Código Orgánico de Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación, que manifiesta textualmente: “Se reconoce facultad de los autores y demás titulares de derechos de disponer de sus derechos o autorizar las utilidades de sus obras o prestaciones a título gratuito y oneroso, según las condiciones que determinen. Esta facultad podrá ejercerse mediante licencias libres, abiertas y otros modelos alternativos de licenciamiento o la renuncia”.

Ibarra, 18 de julio de 2025

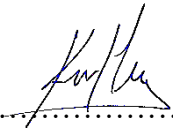
(f):  _____

Kevin Ramiro Morales Ichua

C.C.: 100502784-0

AUTORIA

Yo, *Kevin Ramiro Morales Ichau*, portador de la cédula de ciudadanía N° 15027840-0, declaro que el presente trabajo de investigación es de total responsabilidad del autor, y eximo expresamente a la Pontificia Universidad Católica del Ecuador Ibarra de posibles reclamos o acciones legales.

(f):.....

Kevin Ramiro Morales Ichau

C.C: 1005027840

DEDICATORIA

Una dedicatoria especial a Jehová, que fue mi fuerza cuando las mías ya no alcanzaban.
A mi familia, que supo que, aunque tropezara, nunca dejaría de avanzar.

Lo logré...
porque creí, oré y no me rendí

AGRADECIMIENTO

A Jehová, mi guía y fortaleza, cuya presencia constante iluminó mi camino y me sostuvo en cada desafío hasta alcanzar esta meta. A mis padres, Irene y Ramiro, quienes, con su amor incondicional, sacrificio y enseñanzas sembraron en mí las bases para crecer y seguir adelante. Su apoyo fue el motor que impulsó mis sueños y esfuerzos. A mi hermana Katherine, un verdadero pilar en esta travesía universitaria, cuya compañía, consejos y ánimo fueron fundamentales para superar los obstáculos del camino.

A mis fieles compañeros de desvelo, Loqui y Noha, mis perritos, que estuvieron presentes en las noches más largas, brindándome compañía y sacándome una sonrisa cuando más lo necesité. A Stefan y Cinthya, amigos valiosos que acompañaron esta etapa con su amistad sincera, compartiendo alegrías y motivándome en los momentos complejos.

A mis docentes, cuyo compromiso y ejemplo dejaron una huella imborrable en mi formación, en especial a Moraima Mera, cuya dedicación y apoyo constante marcaron una diferencia significativa en mi desarrollo académico y personal. Finalmente, agradezco a todas las personas que formaron parte de este proceso, pues sin su apoyo, aliento y compañía, no habría logrado llegar hasta aquí.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN TUTOR.....	ii
PÁGINA DE APROBACIÓN DEL TRIBUNAL	iv
ACTA DE CESIÓN DE DERECHOS	iv
AUTORIA.....	vi
DEDICATORIA	vii
AGRADECIMIENTO	vii
RESUMEN	16
ABSTRACT.....	17
CAPÍTULO I	18
INTRODUCCIÓN	18
CAPÍTULO II.....	20
OBJETIVOS	20
2.1. Objetivo General	20
2.2. Objetivos Específicos	20
CAPÍTULO III.....	21
ESTADO DEL ARTE	21
3.1. Contaminación atmosférica.	21
3.1.1. Fuentes de contaminación.....	21
3.1.2. Material particulado.....	22
3.1.3. Procesos de extracción en canteras	24
3.1.4. Antecedentes sobre PM _{2,5} Y PM ₁₀	26

3.2	Impacto ambiental y salud pública de la contaminación por material particulado...	28
3.3	Medidas de contingencia.....	30
3.3.1	Regulaciones Internacionales.....	30
3.3.2	Marco legal nacional sobre la calidad del aire	32
3.3.3	Marco legal nacional.....	32
3.3.4	Normas de calidad del aire ambiente en Ecuador.	33
3.3.5	Índice de calidad del aire (AQI).....	33
3.4	Medidas de contingencia.....	34
3.4.1	Equipos para el control de polvo	34
3.4.2	Sistema de nebulización de agua.	35
3.4.3	Barreras artificiales	36
3.4.4	Barreras naturales.....	38
CAPÍTULO IV.....		39
MATERIALES Y MÉTODOS		39
4.1.	Geolocalización	39
4.1.1	Coordenadas geográficas	39
4.1.2.	Gráfica de localización	40
4.1.3.	Caracterización geológica y edáfica de la cantera San José"	41
4.2	Tipo de investigación	41
4.2.1	Diseño de muestra y frecuencia	41
4.3	Equipo de muestreo.....	42
4.3.1	Monitor de partículas AEROCET 531S.....	42
4.3.2	Plataforma meteorológica Meteoblue	44

4.3.3 Aplicaciones tecnológicas para el análisis y gestión de datos	45
CAPÍTULO V	47
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	47
5.1. Caracterización de material particulado PM _{2,5} y PM ₁₀	47
5.2. Análisis de concentraciones por punto y horario	48
5.2.1. Análisis por punto de muestreo.....	48
5.2.2. Análisis por horario de muestreo	51
5.2.3. Análisis por horarios y zonas	54
5.2.4. Coeficiente de correlación	59
5.2.5 Regresión lineal para predecir concentraciones de material particulado...	61
5.2.6 Análisis de regresión lineal por semanas	64
5.3. Cumplimiento de la normativa nacional de calidad del aire	75
5.4. Proyección de escenario crítico de dispersión de material particulado	77
5.4.1. Dispersión de PM _{2.5} desde la cantera San José mediante HYSPLIT	80
5.4.1.1. Cuadrícula de concentración.....	80
5.4.1.2. Centro de masa.....	84
5.4.1.3. Posiciones de partícula.....	85
5.4.1.4. Hora de llegada	90
5.4.2. Dispersión de PM ₁₀ desde la cantera San José mediante HYSPLIT	91
5.4.2.1. Cuadrícula de concentración.....	91
5.4.2.2. Centro de masa.....	94
5.4.2.3 Posiciones de partícula.....	96
5.4.2.4. Hora de llegada	99

5.5. Plan de manejo ambiental para la cantera “San José”	101
5.5.1. Introducción	101
5.5.2. Línea Base Ambiental.....	102
5.5.3. Identificación y Evaluación de Impactos Ambientales.....	102
5.5.4 Programas del Plan de Manejo Ambiental.....	104
5.5.4.1. Programa de Prevención y Mitigación.....	104
5.5.4.2. Programa de Manejo de Desechos	104
5.5.4.3. Programa de Rehabilitación y Cierre de Cantera.....	104
5.5.4.4 Programa de Educación y Capacitación Ambiental.....	105
5.5.4.5. Programa de Seguridad y Salud Ocupacional.....	105
5.5.4.6. Programa de Relaciones Comunitarias	105
5.5.4.7 Programa de Monitoreo y Seguimiento Ambiental	105
5.5.5. Cronograma de Ejecución (Meses 2025–2026).....	106
5.5.6. Presupuesto Estimado (USD)	106
5.5.7. Conclusión	106
CAPÍTULO VI.....	108
CONCLUSIONES	108
CAPÍTULO VII	109
RECOMENDACIONES.....	109
CAPÍTULO VIII.....	110
BIBLIOGRAFÍA	110
CAPÍTULO IX.....	134
ANEXOS	134

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de los límites permisibles dispuestos por la OMS	31
Tabla 2. Valores de los límites permisibles dispuestos por la EPA.....	32
Tabla 3. Límites permisibles de calidad del aire en Ecuador.....	33
Tabla 4. Índice de calidad del aire (AQI).....	34
Tabla 5. Rango de partículas	35
Tabla 6. Resultados del sistema de niebla seca en PETRANOVA S.A.C.	36
Tabla 7. Coordenadas geográficas de la cantera San José	39
Tabla 9. Zona con mayor carga de PM en la cantera San José	49
Tabla 10. Horario con mayor carga de PM en la cantera “San José”	51
Tabla 11. Determinación de zona y horario con mayor concentración de PM.....	54
Tabla 12. Coeficiente de regresión global entre PM _{2.5} y PM ₁₀	60
Tabla 13. Estadísticas del modelo de regresión lineal de la cantera “San José”	61
Tabla 14. Análisis de varianza de la cantera “San José”	62
Tabla 15. Coeficiente de regresión global entre PM _{2.5} y PM ₁₀	63
Tabla 16. Precipitación diaria en la cantera “San José”, mayo 2025	65
Tabla 17. Estadística de regresión-semana 1	66
Tabla 18. Análisis de varianza-semana 1	66
Tabla 19. Coeficientes del modelo de regresión lineal- semana 1	67
Tabla 20. Estadística de regresión- semana 2	68
Tabla 21. Análisis de varianza- semana 2.....	69
Tabla 22. Coeficientes del modelo de regresión lineal - semana 2.....	70
Tabla 23. Estadística de regresión- semana 3	71
Tabla 24. Análisis de varianza- semana 3.....	71
Tabla 25. Coeficientes del modelo de regresión lineal - semana 3.....	72
Tabla 26. Estadística de regresión- semana 4	73
Tabla 27. Análisis de varianza- semana 4.....	74
Tabla 28. Coeficientes del modelo de regresión lineal - semana 4.....	75
Tabla 29. Cumplimiento de la normativa nacional para PM _{2.5} y PM ₁₀	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Fuentes de emisión	21
Figura 2. Rango del tamaño de la partícula	23
Figura 3. Límites de la cantera.....	40
Figura 4. AEROCET 531S	43
Figura 5. Dirección del viento	44
Figura 6. Dirección del viento	45
Figura 7. Promedios de PM _{2.5} y PM ₁₀ según puntos de muestreo	50
Figura 8. Comparación horaria de PM _{2.5} y PM ₁₀ con barras de error	53
Figura 9. PM _{2.5} y PM ₁₀ zona de extracción por horario.....	55
Figura 10. Comparación horaria de PM _{2.5} y PM ₁₀ en planta de trituración	56
Figura 11. Comparación horaria de PM _{2.5} y PM ₁₀ en zona de almacenamiento/carga ..	58
Figura 12. Comparación horaria de PM _{2.5} y PM ₁₀ en punto externo (100 m).....	59
Figura 13. Gráfico de probabilidad normal para la regresión de PM _{2.5} y PM ₁₀	63
Figura 14. Probabilidad normal de la regresión de PM _{2.5} y PM ₁₀ -Semana 1.....	68
Figura 15. Probabilidad normal para la regresión de PM _{2.5} y PM ₁₀ en la semana 2.....	70
Figura 16. Probabilidad normal para la regresión de PM _{2.5} y PM ₁₀ en la semana 3.....	73
Figura 17. Probabilidad normal para la regresión de PM _{2.5} y PM ₁₀ en la semana 4.....	75
Figura 18. Dispersión inicial de PM _{2.5} desde la cantera San José con HYSPLIT	82
Figura 19. Dispersión media de PM _{2.5} desde la cantera San José con HYSPLIT	83
Figura 20. Dispersión final de PM _{2.5} desde la cantera San José con HYSPLIT	84
Figura 21. Trayectoria del centro de masa del contaminante PM _{2.5}	85
Figura 22. Análisis vertical inicial de la evolución temporal del PM _{2.5}	86
Figura 23. Análisis vertical intermedio de la evolución temporal del PM _{2.5}	88
Figura 24. Análisis vertical final de la evolución temporal del PM _{2.5}	89
Figura 25. Hora de llegada de la pluma de material particulado	91
Figura 26. Dispersión inicial de PM ₁₀ desde la cantera San José con HYSPLIT	92
Figura 27. Dispersión media de PM ₁₀ desde la cantera San José con HYSPLIT.....	93
Figura 28. Dispersión final de PM ₁₀ desde la cantera San José con HYSPLIT	94
Figura 29. Trayectoria del centro de masa del contaminante PM ₁₀ -Modelo HYSPLIT. 96	
Figura 30. Análisis vertical inicial de la evolución temporal del PM ₁₀	97

Figura 31. Análisis vertical inicial de la evolución temporal del PM ₁₀	98
Figura 32. Análisis vertical inicial de la evolución temporal del PM ₁₀	99
Figura 33. Hora de llegada de la pluma de material particulado	101

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexos 1. Registro fotográfico del proceso de monitoreo	134
Anexos 2. Documentación fotográfica del sitio de muestreo	135
Anexos 3. Mediciones de material particulado de la cantera “San José”	136

RESUMEN

La contaminación atmosférica por material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}) representa una significativo a la calidad del aire, la salud humana y el ambiente. En Ecuador, la extracción de áridos y materiales pétreos en canteras generan emisiones significativas que, en muchos casos, no son monitoreadas adecuadamente dificulta la aplicación de medidas de control ambiental efectivas. El presente estudio evaluó la calidad del aire en la cantera “San José” dedicada a la extracción de materiales áridos y pétreos mediante bancos de explotación a cielo abierto, ubicada en San Eduardo, cantón Ibarra, con el objetivo de establecer un diagnóstico técnico que permita orientar la gestión ambiental de las emisiones generadas por actividades mineras. El análisis se enfocó en la medición de material particulado ($PM_{2.5}$ y PM_{10}), en cuatro puntos estratégicos: extracción, trituración, almacenamiento/carga y un punto externo ubicado a 100 metros de la catera. Estos puntos fueron seleccionados para identificar las fuentes principales de emisión directa de partículas y para evaluar la dispersión y el impacto en áreas circundantes, incluyendo un punto testigo que permita comparar la calidad del aire dentro y fuera de la zona de influencia minera, las mediciones se realizaron en tres horarios diarios diferentes. Para la determinación de MP se utilizó un contador de partículas AEROCET 531S y se aplicaron herramientas estadísticas como correlación de Pearson, regresión lineal y ANOVA para interpretar los resultados. Las concentraciones promedio obtenidas fueron de $19.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $PM_{2.5}$ y $60.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} , valores que se encuentran por debajo de los límites establecidos por el Acuerdo Ministerial 097-A. Las zonas de extracción y almacenamiento presentaron los niveles más altos de material particulado, especialmente al mediodía, lo que coincide con una mayor intensidad operativa. Se evidencio una correlación positiva moderada entre $PM_{2.5}$ y PM_{10} ($r = 0.696$), atribuible a que $PM_{2.5}$ forma parte de PM_{10} , por lo que sus concentraciones tienden a variar de manera conjunta. Existe un impacto ambiental bajo y controlado en condiciones climáticas húmedas, sin embargo, es preciso implementar medidas de mitigación focalizadas en zonas críticas y reforzar el monitoreo durante la temporada seca, estas acciones permitirán optimizar la gestión de emisiones y proteger la salud de la población.

Palabras clave: calidad del aire, material particulado, $PM_{2.5}$, PM_{10} , cantera “San José”,

ABSTRACT

Air pollution from particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀) poses a significant threat to air quality, human health, and the environment. In Ecuador, the extraction of aggregates and stone materials from quarries produces substantial emissions, which are often not adequately monitored, hindering the implementation of effective environmental control measures. This study evaluated ambient air quality at the “San José” quarry, located in San Eduardo, Ibarra canton, which operates open-pit extraction of aggregates. The objective was to provide a technical diagnosis to support environmental emission management. PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations were measured at four strategic points (extraction, crushing, storage/loading, and an external point 100 meters away), at three different times per day, using an AEROCET 531S particle counter. Statistical tools such as Pearson correlation, linear regression, and ANOVA were applied. Average concentrations were 19.6 µg/m³ for PM_{2.5} and 60.2 µg/m³ for PM₁₀, remaining below the threshold set by Ministerial Agreement 097-A. The highest values occurred in extraction and storage zones, especially at midday. A moderate positive correlation between PM_{2.5} and PM₁₀ ($r = 0.696$) was identified. Under humid conditions, environmental impact was low and controlled; however, targeted mitigation measures are recommended for critical areas, along with reinforced monitoring during the dry season, to optimize emission management and safeguard public health.

Keywords: air quality, particulate matter, PM_{2.5}, PM₁₀, San José quarry.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Las actividades extractivas en canteras de cielo abierto están en aumento a causa de la industria de la construcción y el desarrollo social y económico de las civilizaciones (Reina, 2013). La contaminación atmosférica ocasionada por material particulado (PM) representa una preocupación creciente sobre la calidad del aire y sus efectos adversos a la salud humana y el ecosistema (Santillán et al., 2021). Estas partículas finas, generadas por actividad industriales como la minera y la explotación de canteras generan enfermedades respiratorias y cardiovasculares, así como contribuye al deterioro ambiental (Galvis et al., 2021). En el ámbito ecuatoriano, las canteras representan fuentes significativas de emisiones de polvo, lo que hace necesario un monitoreo que garantice el cumplimiento de las normas ambientales establecidas por el (Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica [MAATE], 2017).

La cantera “San José”, ubicada en el sector San Eduardo, cantón Ibarra, provincia de Imbabura, se dedica a la extracción y procesamiento de áridos y materiales pétreos mediante bancos de explotación a cielo abierto. Esta actividad conlleva la liberación de material particulado que incide en la calidad del aire en las zonas aledañas, así como la salud de las poblaciones cercanas (García, 2015). Aunque podrían existir antecedentes, la limitada disponibilidad de información técnica accesible y actualizada sobre la calidad del aire en la cantera “San José” evidencia la necesidad de desarrollar un diagnóstico detallado que permita establecer parámetros de referencia ambientales sólidos para orientar la gestión de emisiones atmosféricas. Frente a esta problemática, resulta fundamental llevar a cabo una evaluación rigurosa de las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ para identificar las fuentes principales de contaminación y comprender cómo factores meteorológicos, como la precipitación, influyen en la dispersión y sedimentación de partículas.

El presente estudio empleó un monitor de partículas AEROCET 531S para realizar mediciones en puntos estratégicos de la cantera durante el mes de mayo de 2025, en distintos horarios, con el fin de analizar la variabilidad temporal y espacial de las emisiones. Además, se aplicaron métodos estadísticos para evaluar la correlación entre las fracciones de material particulado y determinar el grado de cumplimiento con la normativa vigente.

Los hallazgos obtenidos aportaron información crucial para fortalecer la gestión ambiental en la cantera “San José”, orientando la implementación de medidas de mitigación efectivas, tales como sistemas de nebulización de agua y la optimización del monitoreo continuo. De este modo, se contribuyó a minimizar los impactos sobre la salud pública y a promover prácticas mineras sostenibles, que garantizaran la protección del medio ambiente y el bienestar de las poblaciones afectadas por actividades extractivas.

CAPÍTULO II

OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

- Evaluar la incidencia de la explotación de áridos y pétreos sobre la calidad del aire en la Cantera San José Sector San Eduardo

2.2. Objetivos Específicos

- Evaluar la calidad del aire de la minera San José y los sectores aledaños mediante el establecimiento de las concentraciones de material particulado PM2.5 y PM 10
- Establecer un plan de manejo ambiental en la Cantera San José, con la finalidad de minimizar el impacto producido.

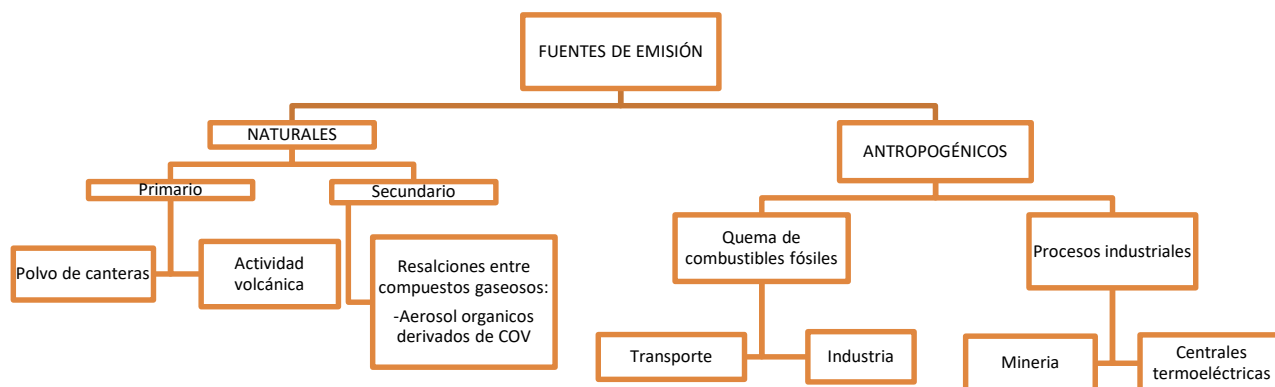
CAPÍTULO III ESTADO DEL ARTE

3.1. Contaminación atmosférica.

Según Romero et al. (2006) en la actualidad cuando nos referimos a la contaminación del aire podemos ver que es un problema grave a nivel mundial debido a que afectan en un grado muy alto al medio ambiente (clima, suelo, ecosistema y agua) y a la salud humana.

De acuerdo con su origen se dividen en causas naturales y antropogénica, las causas naturales emanan de fuentes naturales no vinculadas con actividad humana. En contraste, la contaminación antropogénica son resultados directos de actividades humanas (Bermudes, 2004).

Figura 1.
Fuentes de emisión



Nota. Representación de las fuentes de emisión en la atmosfera. Adaptado de (Gonzáles, 2012) *Calidad del aire en la zona centro y oriente de la ciudad de Manizales: influencia del material particulado (PM₁₀) y lluvia ácida* (p. 30). Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales.

3.1.1. Fuentes de contaminación.

Con base a el Ministerio del Ambiente del Ecuador (2014) la emisión suele dividirse en

tres categorías.

- **Móviles:** son emisiones se vinculan con vehículos que sirven para transporte terrestre.
- **Fijas:** son instalaciones que se encuentran en un espacio ya determinado los cuales son asignados a los procesos industriales y comerciales.
- **Área:** se refiere prácticamente a áreas en donde se liberan contaminantes debido a diversas actividades como el tránsito de contaminantes, gestión de rellenos sanitarios y almacenamiento tanto de gas licuado y gasolina.

De acuerdo con Aránguez et al. (1999) entre los principales contaminantes del ambiente se encuentran el:

- material particulado fino (PM_{2.5}) y grueso (PM₁₀)
- monóxido de carbono
- dióxido de azufre
- óxidos de nitrógeno
- ozono troposférico

Los cuales son responsables del deterioro de la calidad del aire, suelo y agua.

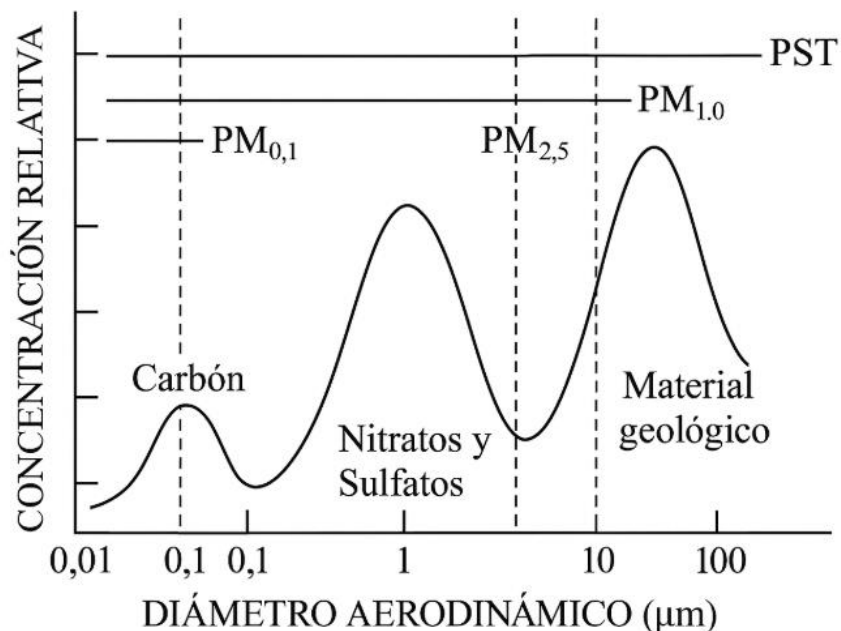
3.1.2. *Material particulado.*

Características. Como dice el Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica [MAATE] (2017) el material particulado se refiere a las partículas sólidas o líquidas, con excepción del agua no combinada, que son emitidas a la atmósfera por fuentes fijas.

Además, el material particulado (PM) tienen un rango de tamaño aproximado de 0,01 a 100 micrómetros (μm) de diámetro (Sánchez, 2020).

Figura 2.

Rango del tamaño de la partícula



Nota. Composición química dominante en cada rango de tamaño del material particulado atmosférico. Adaptado de Galvis y Rojas (2006) *Relación entre PM_{2,5} y PM₁₀ en la ciudad de Bogotá* (p. 8). SciELO.

Estas partículas se consideran indicadores de la calidad debido a que sus componentes presentan una gran capacidad tóxica, estas partículas son emitidas de las industrias, vehículos, minería, deforestación y combustiones. Podemos encontrar fuentes naturales como el polvo generado por canteras, erupciones volcánicas y el polen de las plantas, este material particulado se clasifica en dos grupos principales (Rubio, 2019):

- **PM₁₀:** Las partículas PM₁₀ son partículas gruesas que se caracterizan por tener un diámetro menor a igual a 10 micrómetros ($\leq 10 \mu\text{m}$) siendo este una mezcla de partículas sólidas y líquidas provenientes de procesos de combustión sin control como los que podemos encontrar en industrias (fundición) y en vehículos funcionados con diésel (Alvarado y Cedeño, 2024).
- **PM_{2,5}:** Las partículas PM_{2,5} son partículas totalmente finas estas partículas se caracterizan prácticamente por tener un diámetro aerodinámico igual o inferior a

2,5 micrómetros ($\leq 2.5 \mu\text{m}$) con un origen que se da mayormente a las actividades industriales, mineras y vehiculares (Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica [MAATE], 2017).

Estas partículas debido a su tamaño extremadamente reducido son consideradas la fracción más agresiva debido a su diámetro aerodinámico son 100% respirables y pueden inhalarse y llegar hasta las zonas más profundas de los pulmones donde se da el intercambio de oxígeno y dióxido de carbono (GREENPEACE, 2021).

3.1.3. *Procesos de extracción en canteras*

Una cantera es una excavación superficial en la cual se extraen rocas y minerales no metálicos los que se utilizan para procesos industriales o de construcción (Centro Ecuatoriano de Eficiencia de Recurso, 2022). Las operaciones que se realizan son (González Pernía, 2014):

- **Adecuación de la superficie:** este es el primer proceso que se realiza y se basa en una remoción de la capa principal de la superficie (Jorba y Vallejo, 2010).
- **Formación de bancos de explotación:** al consideras una cantera de cielo abierto en la cual se extrae rocas y arenas se desarrollan bancos o terrazas horizontales de alturas controladas generalmente tiene una altura entre 5-15 metros para mantener un orden, minimizar riesgos de desplazamiento y mejorar la operación de la maquinaria.
- **Excavación y carga:** en este proceso se retira el material sustraído mediante vehículos de carga pesada como excavadoras, retroexcavadoras y volquetas desintegrando progresivamente la roca.
- **Transporte interno**
- **Trituración y clasificación:** el material es sometido a una trituración primaria y secundaria, la cual tiene como objetivo la reducción significativa de su tamaño, para esta fase se utilizan trituradoras de mandíbulas. Este proceso permite la obtención de ripio, grava, polvo de piedra y arena (Oñati, 2018).

3.1.3.1. Dispersión del contaminante

Un contaminante que es liberado a la atmósfera se desplaza en la dirección del viento

dominante y es dispersado por el movimiento de aire perpendiculares a este (Manzur et al., 2012). Los modelos de calidad del aire emplean técnicas matemáticas y numéricas para llegar a simular los procesos físicos y químicos que inciden en la dispersión y relación del material particulado en la atmosfera (López, 2000). Los modelos de dispersión del contaminante son diseñados específicamente para partículas y ayudan a resolver de manera aproximada las ecuaciones de difusión en los cuales se considera los factores de la turbulencia, dirección del viento y condiciones meteorológicas, esto nos permite predecir rápidamente las concentraciones de material particulado en áreas cercanas a las fuentes emisoras, como canteras o industrias (Manzur et al., 2012).

Uno de los modelos más utilizados para analizar la dispersión del contaminante es el de Gaussiano que consiste en calcular la concentración inmediata del contaminante, o el promedio a corto plazo (una hora) a nivel del suelo, generando por una fuente estacional puntual (L. Gallardo, 1997).

Formula:

$$C_j = \frac{Q}{2\pi\sigma\sigma_y\sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{he-z}{\sigma_z}\right)^2\right]$$

C_j : Cantidad de contaminante en el aire durante un corto tiempo, en un punto de coordenadas (x, y, z), calculado en gramos por metro cúbico (g/m^3) (Arregui, 2014).

Q : tasa de emisión determinada en (g/s).

u : Velocidad del viento a la altura donde se libera el contaminante determinado en metros por segundo (m/s).

σ_y : Medida que indica cuánto se extiende el contaminante hacia los lados (horizontalmente), dependiendo de qué tan lejos está el punto desde la fuente en dirección del viento, en metros (m).

σ_z : Medida que indica cuánto se dispersa el contaminante hacia arriba y hacia abajo (verticalmente), también según la distancia desde la fuente en dirección del viento, en metros (m) (Arregui, 2014).

y : Distancia horizontal transversal desde el receptor a la línea central de la pluma determinado en metros

z : Distancia vertical desde el receptor a la línea central de la pluma determinada en metros.

he : Altura total desde donde se libera el contaminante, sumando la altura de la chimenea o

fuerza más la subida que tiene la nube debido a la velocidad de salida y la diferencia de temperatura con el aire (Arregui, 2014).

3.1.4. Antecedentes sobre $PM_{2,5}$ Y PM_{10}

3.1.4.1. Evaluación temporal del material particulado $PM_{2,5}$ y PM_{10} en el Distrito Metropolitano de Quito – Ecuador.

Con base en el estudio de Verdezoto et al. (2022) se evaluó las variaciones temporales de los niveles de material particulado $PM_{2,5}$ y PM_{10} específicamente la temporalidad horario, mensual, estacional y anual en el Distrito de Quito de las zonas de Belisario y Carapungo durante el periodo de 2013- 2020 los cuales dieron 65 mil registros en cada estación.

la metodología empleada consistió en la el uso de equipos llamados Thermo Scientific/FH62 C14 y Thermo Andersen/FH62 C14 con los cuales operan bajo el principio de atenuación de rayos beta. Los resultados obtenidos fueron que la estación Carapungo presento una mayor concentración a comparación de la estación Belisario, en este estudio encontramos que los niveles más altos de $PM_{2,5}$ se registraron a las 06:00 horas en Belisario con $32.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y a las 08:00 horas en Carapungo con un valor de $24.72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que los valores máximos de PM_{10} se registraron en el mes de septiembre a las 06:00 horas con $92,69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y a las 14:00 horas con $103.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la estación Carapungo.

Los resultados fueron que los valores de $PM_{2,5}$ superaron los límites de la Organización Mundial de la salud (OMS, 2024) y los límites para la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire (Ministerio del Ambiente, 2011, pp. 7–8) en todos los años medidos excepto en el año 2020 que fue influenciado por la pandemia, en cambio los valores de PM_{10} superaron los límites tanto para la Organización Mundial de la Salud (OMS) como para la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire (NECA) en todos los años.

En este estudio se evidencio que la topografía de Quito incide de forma determinante en el comportamiento del material particulado debido los factores climáticos como la temperatura o la humedad (Barry y Maesano, 2017)

3.1.4.2. Estudio de calidad del aire en canteras a cielo abierto en general roca.

En el estudio de Páez et al. (2017) se evaluó la calidad del aire en relación con la emisión de partículas (PM_{10}) generadas por la actividad minera en canteras de yeso. La metodología utilizada fue un modelo de dispersión gaussiano AERMOD para poder cuantificar la dispersión de PM_{10} , basado en los datos meteorológicos de la estación del Aeropuerto de Neuquén y los datos topográficos de Shuttle Radar Topography Mission-SRTM, las emisiones de PM_{10} se calcularon utilizando factores de emisión de contaminantes de aire, calculando tanto su identificación y agrupación según su origen (Turner, 1970).

Se evaluaron todas las etapas del ciclo de explotación del yeso, identificando las principales fuentes de emisión como son las voladuras, la re-suspensión de polvo que se da por la maquinaria dentro de la cantera, la molienda primaria y el transporte de material por el camino principal y secundario. Los resultados fueron que las concentraciones diarias de PM_{10} superaron los $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ los cuales estaban dentro del límite legal en Argentina en áreas cercanas a las canteras y caminos de tránsito, aunque no en áreas urbanas sensibles como son escuelas y colegios.

Los niveles más altos de PM_{10} se identificaron en la re-suspensión de polvo dentro de las canteras con un valor de 1.63 g/s y 2.36 g/s , en el transporte de materiales los datos fueron 10.7 g/s y 9.9 g/s en las canteras. Además, podemos observar que las mayores concentraciones diarias de PM_{10} se dan en invierno y otoño con datos hasta $441.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $370.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que la mayor concentración media anual se da en las mismas estaciones con datos hasta los $827.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $407.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

3.1.4.3. Evaluación de calidad del aire a través de $PM_{2,5}$ y PM_{10} de la ciudad de Guayaquil en período de lluvia y sequía.

Esta investigación se evaluará la calidad del aire en la ciudad de Guayaquil entre octubre de 2016 y marzo de 2017, abarcando tanto los periodos de lluvia y sequía en el cual seleccionaron cuatro sectores los que fueron más representativos como son la cementera, centro de la ciudad, sector residencial e industrial.

La metodología implementada fue un análisis estadístico que se midió con un equipo gravimétrico en tiempo real marca HAZ DUST, modelo EPAM 5000 conjuntamente se

complementó con información meteorológica como son presión, temperatura, dirección del viento y humedad (Angulo, 2008).

Como resultado podemos encontrar que dos sectores no cumplen con la normativa ecuatoriana siendo estos la cementera con concentraciones de $PM_{2,5}$ aproximadamente de $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ los días lunes superando los límites ecuatorianos que dice que debe tener un máximo de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para 24 horas, y el sector industrial los días martes debido principalmente a la actividades generadas en el sector.

En este caso de los sectores centro y residencial podemos encontrar que los dos cumplen con la normativa ecuatoriana teniendo en cuenta que en el sector centro las concentraciones promedio fueron de $16,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en sequía y $9,58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en lluvia.

Mientras que en el sector residencial las concentraciones más frecuentes fueron entre 10 a $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en épocas de lluvia y de 5 a $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en épocas de sequía (Dávalos y Arévalo, 2019).

3.2 Impacto ambiental y salud pública de la contaminación por material particulado.

- **Efectos en el clima.**

De acuerdo con A. Dávalos (2018) los efectos más nocivos son los que se generan en procesos industriales minero metalúrgicos, en las etapas de remoción, transporte y pulverización, debido a su disminución de diámetro las partículas tienen la capacidad de permanecer en suspensión y una mayor flotabilidad.

En este caso el efecto que se da entre los fenómenos climáticos y el material particulado que se encuentra suspendido en la atmosfera se llama integración compleja y bidireccional el cual realiza la emisión y transporte del contaminante llamado material particulado (Aguilar, 2024).

Estas partículas que estas suspendidas en la atmosfera inciden directamente y son las encargadas de un cambio en el sistema climático del planeta, este fenómeno vario debido al tamaño y composición de la partícula en la atmosfera que realiza un incremento o reducción en la cantidad de energía que llega a la superficie terrestre lo que provocaría que la atmosfera se caliente o enfríe (Regalado, 2015).

El estudio de Castillo y Rodríguez (2016) indica que las partículas en suspensión actúan como núcleos de condensación para el vapor del agua lo que hace que el desarrollo de nubes sea más factible y por ende influya en el régimen de precipitación, estas partículas tanto sólidas como líquidas modifican las características físicas que tienen una nube lo cual es un problema que altera

indirectamente al clima, pero la interacción directa con la radiación convierte al material particulado en un elemento clave en la dinámica global.

- **Efectos en la salud animal.**

En la actualidad no se puede encontrar mucha información comprobada acerca de los efectos que ocasiona el material particulado en los animales (Barrio, 2017). Por otro lado, en la investigación de Castillo y Rodríguez (2016) vemos que el ganado que pastorear cerca de las vías o caminos sin asfalto ingieren material particulado en sus pastizales, lo que conlleva a problemas como rigidez articular, deterioro gradual de los dientes y una reducida producción de leche.

- **Efectos en el recurso hídrico**

El material particulado en los recursos hídricos es un tema clave e importante en el estudio de contaminación ambiental acuífera (Escobar, 2002). Estas partículas son principalmente de origen alóctono por lo cual tienen facilidad de contaminación, según el Ministerio de Obras Públicas (1996) el porcentaje que podemos encontrar de metales pesados (As, Cd, Hg, Pb), nutrientes (N, P) y carbono orgánico que se transportan por material particulado en suspensión va desde los 20 a 99%.

Los metales pesados son uno de los problemas más grandes debido a la contaminación severa de las fuentes hídricas esto se debe a su gran toxicidad lo cual causa daños en el sistema ecológico y ambiental afectando a la cadena trófica lo cual es el soporte de la vida humana (Pabón et al., 2020).

- **Efectos en la salud humana**

En un estudio realizado por la (Organización Mundial de la Salud, 2024) observamos que la contaminación del aire es uno de los riesgos más severos para la salud humana. En Francia, Suiza y Australia se realizó una investigación que indica que la contaminación del aire conlleva a una mortalidad del 6% de la población y un aumento significativo de enfermedades respiratorias (Ballester, 2005). La exposición de material particulado en el ambiente es un componente significativo de la contaminación atmosférico y se ha identificado como el principal factor de riesgo asociado de muerte y enfermedad en el mundo (World Health Organization, 2014).

El material particulado PM_{10} son un factor determinante en la mayoría de problemas a la salud humana debido a que estas partículas tienen la facilidad de llegar a la profundidad de los pulmones y las de menor diámetro aéreo ($\leq PM_{10}$) pueden alcanzar el torrente sanguíneo (Environmental Protection Agency, 2025).

El sistema respiratorio es la vía principal de entrada para el material particulado hacia el organismo, las partículas en suspensión PM_{10} generadas por los procesos mineros (Canteras) al entrar al sistema respiratorio producen alergias e irritaciones dado que se quedan atrapadas en las cavidades nasales y la faringe (Alvis, 2012), mientras que las partículas más finas ($PM_{2.5}$) “pueden estancarse en las partes altas del árbol traqueobronquial, penetrar los pulmones, producir irritaciones en los tejidos y también contener materiales tóxicos que afectan la respiración” (Jennifer, 2020, p. 14).

La EPA (2017) resalta que la contaminación por material particulado tiene un mayor impacto en las personas que tienen enfermedades cardiovasculares o pulmonares. En muchos estudios encontramos que este grupo especial de personas tienden a llegar a problemas severos como cáncer de pulmón y anomalías reproductivas (Gaviria et al., 2008).

3.3 Medidas de contingencia

3.3.1 Regulaciones Internacionales

Los límites establecidos por la organización mundial de la salud (OMS) y la Environment Protection Agency (EPA) establecen los siguientes parámetros para la calidad del aire.

Tabla 1.

Valores de los límites permisibles despuestos por la OMS

Contaminante	Unidades	Tiempo promedio	Meta intermedia				Nivel de las directrices sobre la calidad del aire
			1	2	3	4	
MP _{2.5}	μg/m ³	Anual	35	25	15	10	5
		24 horas	75	50	37,5	25	15
MP ₁₀	μg/m ³	Anual	70	50	30	20	15
		24 horas	150	100	75	50	45

Nota. Niveles recomendados de las directrices sobre calidad del aire y metas intermedias. Adaptado de (OMS, 2024) *Contaminación del aire ambiente (exterior) y salud*. Organización Mundial de la Salud.

Los valores críticos en las directrices sobre la calidad del aire, establecidos por la OMS representan los límites máximos recomendados para la concentración de contaminante como PM_{2.5} y PM₁₀, estos límites están fundamentados en revisiones sistemáticas y análisis combinados científicos que relacionan la exposición a estos contaminantes con efectos adversos en la salud humana (OMS, 2021)

Las directrices incluyen diferentes niveles:

- Metas intermedias: objetivos progresivos y alcanzables para zonas muy contaminadas, que facilitan la reducción gradual de contaminantes.
- Niveles de las directrices: son límites más estrictos y bajos, recomendados para proteger eficazmente la salud pública.

Tabla 2.

Valores de los límites permisibles dispuestos por la EPA.

Contaminante	Primario/secundario	Tiempo promedio	Nivel
PM _{2.5}	Primario	1 año	9 µg/m ³
	Secundario	1 año	15 µg/m ³
	Primario y secundario	24 horas	35 µg/m ³
PM ₁₀	Primaria y secundaria	24 horas	150 µg/m ³

Nota. Estándares Nacionales de Calidad del Aire Ambiental. Adaptado de (EPA, 2024).

Tabla NAAQS. United States Environmental Protection Agency.

3.3.2 Marco legal nacional sobre la calidad del aire

En la Constitución del Ecuador en el Art. 14 “Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak kawsay*” (Constitución del Ecuador, 2008, p. 14). Determina también que es relevancia pública la conservación del ambiente, protección de la biodiversidad, ecosistemas y asegurar el patrimonio genético del país al igual que la precaución del daño del medio ambiente y su rehabilitación de los espacios naturales deteriorados con el objetivo de manejar adecuadamente el entorno natural y proteger la salud humana (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2023, p. 1).

3.3.3 Marco legal nacional

En el Art. 1 se prohíbe expulsar a la atmósfera o liberar en ella, sin cumplir las normas técnicas y regulaciones establecidas. Estos contaminantes pueden perjudicar a la salud humana, flora y fauna y los recursos o bienes del estado o personas particulares (Congreso Nacional, 2004).

En el Art. 5 las entidades tanto públicas como privadas en la construcción de proyectos industriales o de procesos que conlleve a alterar la contaminación del aire y dañar los sistemas ecológicos deben presentar a el Ministerio de Salud y Ambiente para los estudios relaciones con los impactos ambientales generados y las medidas de control que se aplicaran (Congreso Nacional,

2004).

3.3.4 Normas de calidad del aire ambiente en Ecuador.

Las presentes normas de calidad tienen como objetivo un lineamiento que determina el bienestar y la calidad del aire en los diferentes entornos naturales, de esta manera se establecieron límites máximos permisibles de los contaminantes del aire en este caso PM_{2.5} y PM₁₀ (Ministerio del Ambiente, 2011).

Tabla 3.

Límites permisibles de calidad del aire en Ecuador

Contaminante	Valor máximo	Unidad	Periodo de medición
PM _{2.5}	50	μg/m ³	Valor promedio de las muestras reunidas en 24 horas.
	15		Valor promedio de las muestras reunidas en un año.
PM ₁₀	100		Valor promedio de las muestras reunidas en 24 horas.
	50		Valor promedio de las muestras reunidas en un año.

Nota. Límites máximos permisibles en la norma de calidad del aire. Adaptado de (Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica [MAATE], 2017). *Acuerdo Ministerial 97*. Ministerio del Ambiente de Ecuador.

3.3.5 Índice de calidad del aire (AQI)

El índice de calidad del aire AQI son parámetros globales que se utiliza para establecer las concentraciones de contaminantes atmosféricos en una escala numérica y cualitativa (secretaría de Ambiente, 2023).

Tabla 4.*Índice de calidad del aire (AQI)*

Niveles del Índice de la calidad del aire preocupantes para la salud	Niveles de preocupación	Valor numérico	Significado
Verde	Bueno	0 a 50	La calidad del aire se considera satisfactoria y la contaminación atmosférica presenta un riesgo escaso o nulo.
Amarillo	Moderado	51 a 100	La calidad del aire es aceptable, pero para algunos contaminantes podría existir una preocupación moderada para la salud de un grupo muy pequeño de personas excepcionalmente sensibles a la contaminación ambiental.
Naranja	Insalubre para grupos sensibles	101 a 150	Los miembros de grupos sensibles pueden padecer efectos en la salud. Probablemente no afectará a las personas en general.
Rojo	Insalubre	151 a 200	Todos pueden comenzar a padecer efectos en la salud y los miembros de grupos sensibles pueden padecer efectos más graves.
Morado	Muy insalubre	201 a 300	Advertencias sanitarias de condiciones de emergencia. Son mayores las probabilidades de que toda la población esté afectada.
Granate	Peligroso	301 y superior	Alerta sanitaria: todos pueden padecer efectos sanitarios más graves.

Nota. Índice de calidad del aire (AQI). Adaptado de (CORPAIRE, 2004, p. 14). Secretaria de Ecuador.

3.4 Medidas de contingencia

3.4.1 Equipos para el control de polvo

La captura efectiva para un sistema de purificación eficiente depende del tamaño y las características físicas como químicas del contaminante, antes de implementar tecnología de emisiones, siempre es fundamental realizar un estudio previo con todas estas características para

seleccionar el tratamiento adecuado (Quenta, 2022)

Tabla 5.

Rango de partículas

EQUIPOS	Rango de partículas que atrapan en micras
Precipitadores electrostáticos	0.01 a 90
Torres empacadas	0.01 a 100
Filtros de papel	0.005 a 8
Lavadores de gases	0.05 a 90
Separadores centrifugados	0.05 a 100
Cámaras de sedimentación	5 a 1000

Nota. Rango óptimo de captura de partículas para la eficiencia de equipos de control de emisiones. Adaptado de (Carrillo, 2011, p. 37). *Diseño y Cálculo de un Sistema de Extracción Localizada de Humos Metálicos y Gases Provenientes del Proceso de Soldadura.* ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL.

3.4.2 Sistema de nebulización de agua.

En las etapas de extracción, almacenamiento y carga existe un incremento significativo de material particulado por lo tanto lo más recomendable son los sistemas de nebulización de agua (Gobierno Vasco-Dirección de Planificación Ambiental, 2012).

En este contexto, un sistema de nebulización en una cantera a cielo abierto actuaría como un absorbente de partículas de polvos suspendidas en el medio, este proceso crea una niebla húmeda que aumentaría la masa hídrica del material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) lo que resulta una mayor fuerza gravitatoria y por ende una precipitación al suelo (Oficina Internacional del Trabajo, 1965).

De acuerdo con Valenzuela et al. (2014) se realizó técnicas para controlar el material particulado en suspensión mediante procesos de nebulización en canteras, este estudio se realizó en lugares con pendientes elevadas, para este estudio se utilizó mangueras de 2,5 a 5 cm de

diámetro con boquillas especiales y aspersores para su distribución fina y efectiva debido a que el tanque contiene una mezcla de agua y aditivos para mejorar la adhesión.

La empresa PETRANOVA S.A.C. implementó un sistema de niebla seca en su proceso de chancado. Tras la instalación, se realizaron dos monitoreos que evidenciaron una reducción significativa en la concentración de partículas en suspensión, especialmente en las fracciones PM₁₀ y PM_{2.5}, lo que confirma la efectividad del sistema bajo condiciones operativas reales.

En la empresa PETRANOVA S.A.C se puede ver una disminución de más del 50% después de implementación del sistema de niebla seca siendo en el proceso de chancado siendo este un sistema eficaz y efectivo (Dueñas, 2023).

Tabla 6.

Resultados del sistema de niebla seca en PETRANOVA S.A.C.

Estación de monitoreo	PM₁₀	PM_{2.5}
Pretratamiento	(µg/m³)	(µg/m³)
Barlovento	53.9	9.1
Sotavento	58.7	11.1
Estación de monitoreo	PM₁₀	PM_{2.5}
Postratamiento	(µg/m³)	(µg/m³)
Barlovento	21.5	4.2
Sotavento	25.3	4.7

Nota. Resultados obtenidos en la tesis realizada en la empresa PETRANOVA S.A.C. Adaptado de (Dueñas, 2023, p. 72). *Implementación de un sistema de mitigación de material particulado en el proceso de chancado de la unidad minera PETRANOVA S.A.C.* Universidad Católica de Santa María.

3.4.3 Barreras artificiales

3.4.3.1 Filtros de mangas

Estos filtros de manga son más eficaces puesto que permiten cumplir con la normativa más estricta también se considera por ser uno de los procesos más económicos y su mantenimiento no afecta el proceso productivo (Orralla, 2010). Este estudio propuso una minimización de material particulado generado en el proceso de clinkerización del cemento mediante filtros de mangas que contienen una estructura filtrante de fibra sintética especializada para las propiedades físicas y químicas del material particulado y sus altas temperaturas al salir del proceso de horno, teniendo en cuenta las partículas de 10 μm en el área de operación, para finalizar realizaron un programa Java para poder cuantificar la reducción de material particulado (Castillo y Velásquez, 2019).

3.4.3.2 Ciclones

Son dispositivos centrífugos instalados en procesos industriales y minería “donde la entrada de partículas es tangencial al cuerpo del cono, forzando el material hacia la parte externa lo que disminuye la velocidad del aire y propicia el desprendimiento de partículas” (Orralla, 2010, p. 18). Estos ciclones se caracterizan por separar partículas con diámetros mayores a 5 μm logrando alcanzar una efectividad del 90% sin embargo partículas más pequeñas también son separadas dependiendo los casos (Arciniégas, 2012).

3.4.3.3 Lavado Venturi

El lavado Venturi es utilizado para el control de material particulado menor o igual a 10 micras (μm), en el lavador Venturi se identifica tres zonas que son: zona convergente, garganta y zona divergente (Machado y Palacios, 2023). Su funcionamiento se basa en el ingreso del contaminante hacia la zona convergente en el cual aumenta su velocidad y entra a la zona “garganta” con una velocidad máxima donde se adhiere gotas de agua y se realiza un rompimiento de la tensión superficial (Pilay y Gavidia, 2020), por último, serán removidas y descargadas este lavado, este proceso es uno de los mejores en el tema de canteras debido a que puede manejar neblinas y su mantenimiento es bajo (EPA, 2003).

3.4.4 Barreras naturales

La implementación de barreras naturales en procesos de minería a cielo abierto sirve para controlar las partículas suspendidas que se dan en los procesos de extracción, procesamiento y carga, estas barreras tienen la finalidad de reducir la velocidad del material particulado evitando turbulencias (Gobierno Vasco-Dirección de Planificación Ambiental, 2012). Además, la vegetación retiene las partículas suspendidas en las hojas, esto depende de la especie, las características morfo-anatómicas y su grado de porosidad, para estas barreras se utilizan especies vegetales de la zona y no potencialmente invasoras (Dalmaso et al., 1997)

CAPÍTULO IV

MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Geolocalización

La Cantera San José está ubicada en el barrio San Eduardo, situada en el sector suroeste de la ciudad de Ibarra. Este sector presenta una localización geográfica aproximada de $0,30957^\circ$ de latitud norte (equivalente a $0^\circ 18' 34''$ N) y $-78,10488^\circ$ de longitud oeste (equivalente a $78^\circ 6' 18''$ O).

4.1.1 Coordenadas geográficas

La Cantera San José cuenta con 5 hectáreas de superficie (Flores, 2019).

Tabla 7.

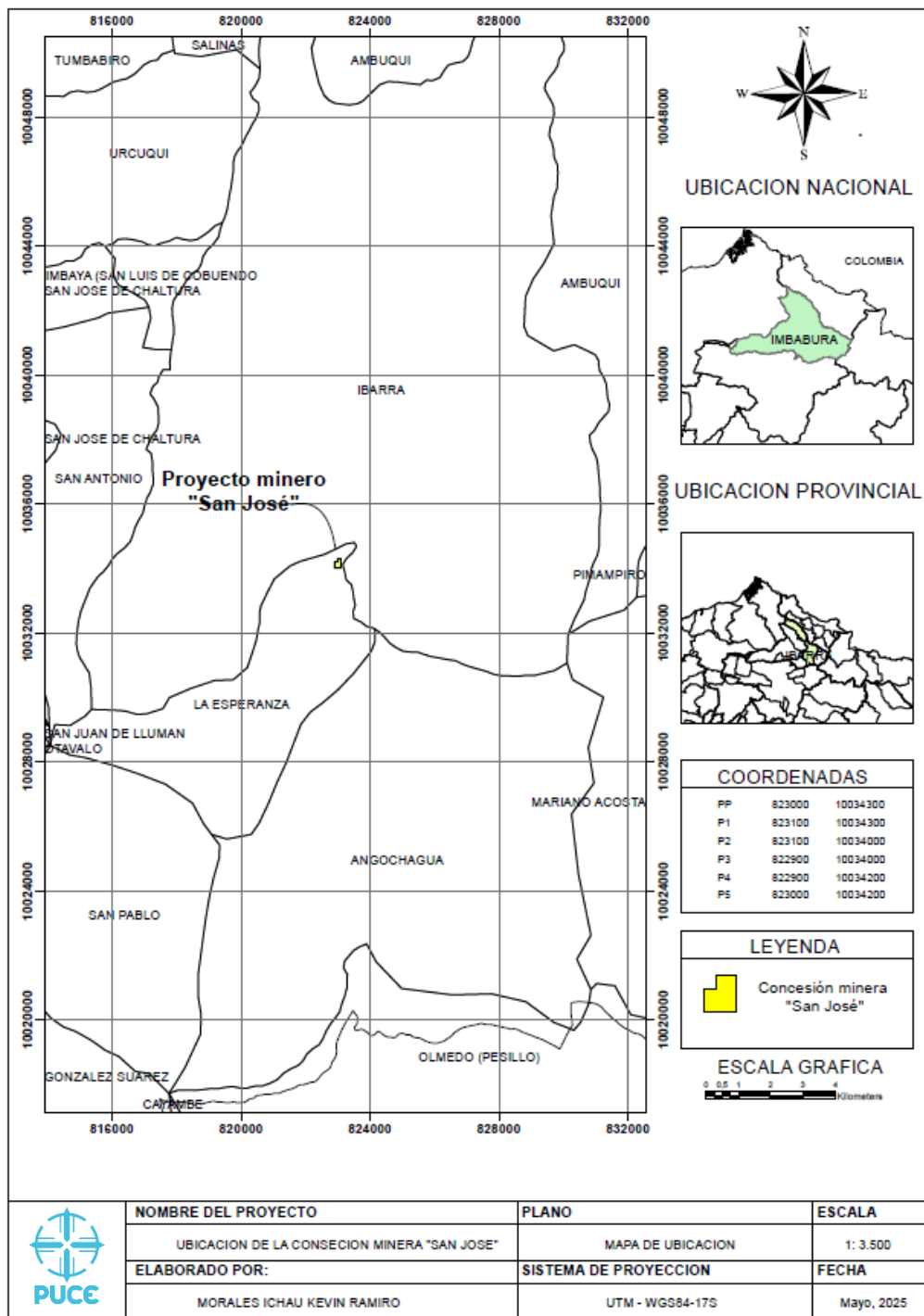
Coordenadas geográficas de la cantera San José

Punto	*X (UTM)	*Y (UTM)
P. P	823000	10034300
P1	823100	10034300
P2	823100	10034000
P3	822900	10034000
P4	822900	10034200
P5	823000	10034200

Nota. Los puntos geográficos de la cantera San José fueron establecidos del PLAN DE ACCIÓN MINERA en el proyecto de “San José” (Flores, 2019). *Las coordenadas geográficas X, Y están representadas en el sistema WGS84, Proyección UTM, Zona 17.

4.1.2. Gráfica de localización

Figura 3.
Límites de la cantera



Nota. Mapa de ubicación de la cantera “San José”. Generado con ArcGIS Pro [Software] versión 3.2 (Esri, 2023)

4.1.3. Caracterización geológica y edáfica de la cantera San José"

La cantera "San José" se encuentra en una zona geológicamente activa resultado de la convergencia de las placas Nazca y Sudamericana, lo que ha generado actividad volcánica y formación de cordilleras Real y Occidental (Gutscher et al., 1999). El área está cubierta por depósitos volcánicos del Plioceno-Cuaternario, formados principalmente por lavas andesíticas, tobas y brechas volcánicas, pertenecientes a los complejos volcánicos Imbabura y Angochagua. El basamento geológico está compuesto por rocas máficas y ultrabásicas (Vallejo, 2007).

La morfología de la cantera está caracterizada por pendientes pronunciadas entre 40 % y 70 %, con desniveles que varían entre 25 y 100 metros, producto del disectamiento hídrico de antiguos depósitos volcánicos. Esta configuración morfológica limita la ventilación natural y favorece la acumulación de material particulado en suspensión (Flores, 2019)

Los suelos predominantes derivan de cenizas volcánicas, principalmente Humic Udivitrands con textura franco arenosa, pH ligeramente ácido (6,3) y contenido moderado de materia orgánica (5,1 %) (Instituto Espacial Ecuatoriano, 2013). En zonas de relieve más escarpado, aparecen Pachic Hapludolls con mayor materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico. Estos suelos contribuyen a la estabilidad del terreno y afectan la generación de polvo durante la actividad minera (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, 2014).

4.2 Tipo de investigación

El tipo de investigación corresponde a un estudio cuantitativo, con un diseño no experimental, descriptivo y comparativo cuya finalidad es analizar la concentración del material particulado PM_{2,5} y PM₁₀ de la cantera "San José".

El enfoque cuantitativo plantea a la ciencia como una unidad meteorológica que se basa en principios sistemáticos similares a los empleados en las ciencias exactas y naturales, tiene como finalidad principal proporcionar explicaciones objetivas a diferentes fenómenos observables, mediante la creación de datos y formulación de normas y leyes generales (Monje, 2011). De acuerdo con (Hernández et al., 2014) el enfoque cuantitativo resulta altamente pertinente y adecuado en estudios de Calidad del Aire debido a que facilita la aplicación de herramientas estadísticas que ayudan a la interpretación y comparación de datos recolectados.

4.2.1 Diseño de muestra y frecuencia

El método técnico adaptado en esta investigación se fundamentó en un esquema sistemático con mediciones in situ (en el lugar) (Gallardo, 2017). Esto permitió caracterizar la dinámica del material particulado en función de las fuentes de contaminación que presenta en la cantera “San José” y la dispersión del contaminante hacia las zonas aledañas. Para llevar a cabo esta investigación se definieron cuatro puntos de monitoreo, tres de ellos ubicados dentro del área operativa de la cantera:

- Zona de extracción
- Planta de trituración
- Almacenamiento y carga

El cuarto punto se estableció a 100 metros de la cantera, en la dirección del viento dominante, con el propósito de evaluar la dispersión del material particulado hacia áreas externas, permitiendo analizar el comportamiento en función del vector viento y las características topográficas del lugar (Rojano et al., 2016).

Los puntos de muestreo fueron seleccionados siguiendo criterios técnicos establecidos por la (EPA, 2017), los cuales recomiendan ubicarlos en zonas con influencia directa de las fuentes de emisión. La frecuencia de muestreo establecida fue de cuatro días por semana durante cuatro semanas consecutivas en tres horarios diferentes:

- 08:00
- 12:00
- 15:00

Estos horarios de distribución corresponden a los momentos de mayor actividad operativa en la cantera “San José”, según estudios previos realizados de Núñez (2018) evaluaron los puntos más críticos y con mayor influencia de material particulado esto permitió identificar la dispersión del polvo en condiciones operativas y meteorológicas diferentes, en el mismo sentido la Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros (2007) recomienda en entornos extractivos de canteras a cielo abierto se realice mediciones en diferentes puntos y horarios del día por un periodo mínimo a una semana con el fin de asegurar la representatividad estadística de los datos

4.3 Equipo de muestreo

4.3.1 *Monitor de partículas AEROCET 531S.*

El monitor de partículas AEROCET 531S es un instrumento de medición de calidad del

aire portátil completo, “En modo de conteo, la unidad mide el conteo de partículas en cuatro tamaños fijos (0,5 μm , 1,0 μm , 5,0 μm y 10,0 μm) con baja sensibilidad y en cinco tamaños fijos (0,3 μm , 0,5 μm , 1,0 μm , 5,0 μm y 10,0 μm) con alta sensibilidad” (Met One Instruments, 2014, p. 5). En este estudio lo configuramos en modo masa que muestra seis rangos de tamaño:

- PM_1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- $\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- PM_4 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- PM_7 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Su función se basa en el principio de emisión de un haz de luz láser, este es dirigido a través de compartimento de medición por donde circula el aire ambiente. Estas partículas en suspensión interactúan con el rayo láser y generan un fenómeno de dispersión óptica, esta dispersión se da en múltiples direcciones y es captada por un fotodetector tanto en tamaño como en cantidad de partículas presentes, el monitor de partículas convierte esta información en unidades de masa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (Nguyen et al., 2021).

Figura 4.

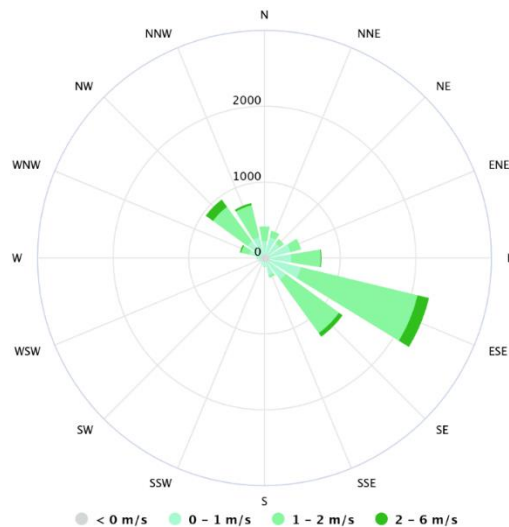
Instrumento de medición de MP AEROCET 531S



Nota. Instrumento de medición de material particulado AEROCET 531s. Adaptado de (Met One Instruments, 2014) *AEROCET 531S Particle Mass Profiler y Counter*.

Figura 6.
Dirección del viento

Hacienda San Juan
0.30°N, 78.10°W (2452 m asl).
Model: ERA5T.



Nota. Representación de la dirección del viento en la cantera “San José”. Adaptado de MeteoBlue AG (2025) *Pronósticos de la dirección del viento de un año*. Windy Company.

La rosa de los vientos generada mediante la plataforma Meteoblue evidencia que, durante el análisis anual, el viento sopla mayormente desde el sureste (SE) hacia el noreste (NW) siendo esta la dirección del viento predominante en la cantera “San José” (MeteoBlue AG, 2025).

4.3.3 Aplicaciones tecnológicas para el análisis y gestión de datos

El análisis de datos en esta investigación se llevó a cabo con el propósito de evaluar el comportamiento del material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} en el área de influencia de la cantera “San José”, a través de herramientas estadísticas que faciliten no solo describir los valores recolectados, sino también identificar relaciones, patrones y diferencias significativas entre puntos de muestreo y horarios. Este análisis es esencial para determinar si las concentraciones de material particulado cumplen con los límites establecidos por la normativa ecuatoriana de calidad del aire (Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica [MAATE], 2017).

En este estudio se utilizó el software Microsoft Excel que es una herramienta muy reconocida en el ámbito investigativo por su versatilidad debido a que permite realizar cálculos, aplicar funciones estadísticas, generar gráficos y tablas dinámicas (Pérez, 2006). El software Excel es una de las aplicaciones más potentes en el tratamiento de información tabular, en esta investigación es un recurso confiable para el análisis de datos ambientales como la calidad del aire (Marín y Zapata, 2017).

En la primera etapa de la investigación los datos fueron organizados en tablas, clasificado en cada medición de $PM_{2,5}$ y PM_{10} según su fecha, hora y lugar donde se llevó a cabo la muestra, posteriormente se aplicó análisis biométricos con el fin de analizar de manera más profunda el comportamiento conjunto del material particulado $PM_{2,5}$ y PM_{10} (Ruiz et al., 2009).

Se desarrolló en el software Excel la prueba de coeficiente de correlación de Pearson en el cual nos permitió medir la relación lineal que existe entre el material particulado $PM_{2,5}$ y PM_{10} para determinar si ambos contaminantes tienen una correlación positiva significativa indicando que si existe una variación en la concentración del uno se refleja proporcionalmente en el otro (J. D. Hernández et al., 2018). Posteriormente se realiza una prueba de varianza (ANOVA), según Dagnino (2014) esta es una técnica estadística que permite evaluar simultáneamente el efecto de múltiples mediciones. En este estudio se empleará para determinar si existen diferencias significativas en las concentraciones promedio de material particulado $PM_{2,5}$ y PM_{10} tanto en los puntos de muestreo como los intervalos de tiempo facilitando la evaluación del impacto de factores específicas sobre la variable analizada.

CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Caracterización de material particulado PM_{2,5} y PM₁₀

La caracterización preliminar de los niveles de material particulado (PM_{2,5} y PM₁₀) se llevaron a cabo en cuatro puntos de monitoreo establecidos estratégicamente en la cantera “San José”, localizado en el sector Santa Rosa del Tejas, cantón Ibarra. Estos puntos se colocaron en tres zonas dentro de la cantera (extracción, trituración y almacenamiento) y un punto externo, ubicado a 100 metros en dirección del viento predominante, con el objetivo de analizar la dispersión del contaminante hacia áreas habitadas, obteniendo valores que se representan en la Tabla 8.

Estos resultados obtenidos fueron comparados con los Límites Máximos Permisibles establecidos en el Acuerdo Ministerial 097-A (Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica [MAATE], 2017), que establece valores de 50 µg/m³ para PM_{2,5} y 100 µg/m³ para PM₁₀ en promedio de 24 horas. En todos los días evaluados, las concentraciones se mantuvieron por debajo de los límites máximos permisibles, esto indica que durante el periodo analizado (mayo 2025) la calidad del aire en el área de influencia de la cantera cumplió con la normativa ambiental vigente en el Ecuador.

Es importante considerar que durante este mes se registraron condiciones climáticas con una alta frecuencia de precipitación, lo que tuvo una influencia directa en la reducción de las concentraciones de material particulado en la atmosfera. La presencia de lluvias favorece el arrastre de partículas del aire hacia el suelo, fenómeno conocido como remoción atmosférica por precipitación (Figuerola et al., 2013). Ese proceso reflejo valores más bajos de PM_{2,5} y PM₁₀ durante los días de monitoreo, esta condición debe considerarse como un factor atenuante al momento de analizar los datos, ya que puede influir en la intensidad aparente de las emisiones. El promedio general es de 19,6 µg/m³ para PM_{2,5} y 60,2 µg/m³ para PM₁₀, valores que reflejan una contaminación moderada, típica en zonas de explotación minera a cielo abierto (Awos et al., 2024). Estos resultados cumplen con el primer objetivo específico al determinar las concentraciones de PM_{2,5} y PM₁₀ en los distintos puntos de la cantera, estableciendo la línea base

de calidad del aire. Esta información permite sustentar los análisis posteriores sobre la dispersión de contaminantes y la efectividad de las estrategias propuestas para mitigar su impacto ambiental.

Tabla 8.

Promedio mensual de PM_{2.5} y PM₁₀ en mayo 2025

Parámetro	Concentración promedio de la cantera "San José" (µg/m³)
PM _{2.5}	19,6
PM ₁₀	60,2

Nota. Los valores corresponden al promedio mensual registrado durante mayo de 2025 en la cantera “San José”, a partir de cuatro puntos de monitoreo establecidos en zonas estratégicas.

5.2. Análisis de concentraciones por punto y horario

5.2.1. Análisis por punto de muestreo

Los resultados obtenidos indican que las concentraciones más elevadas de material particulado se registraron en la zona de extracción, con valores promedio de 23,21 µg/m³ para el material particulado fino PM_{2.5} y 69,25 µg/m³ para material particulado grueso PM₁₀. Finalmente, el punto externo a 100 metros, con PM_{2.5} de 12.11 µg/m³ y PM₁₀ de 44.69 µg/m³, presenta las concentraciones menores, evidenciando la disminución de PM con la distancia debido a el depósito gravitacional (Bravo, 2017).

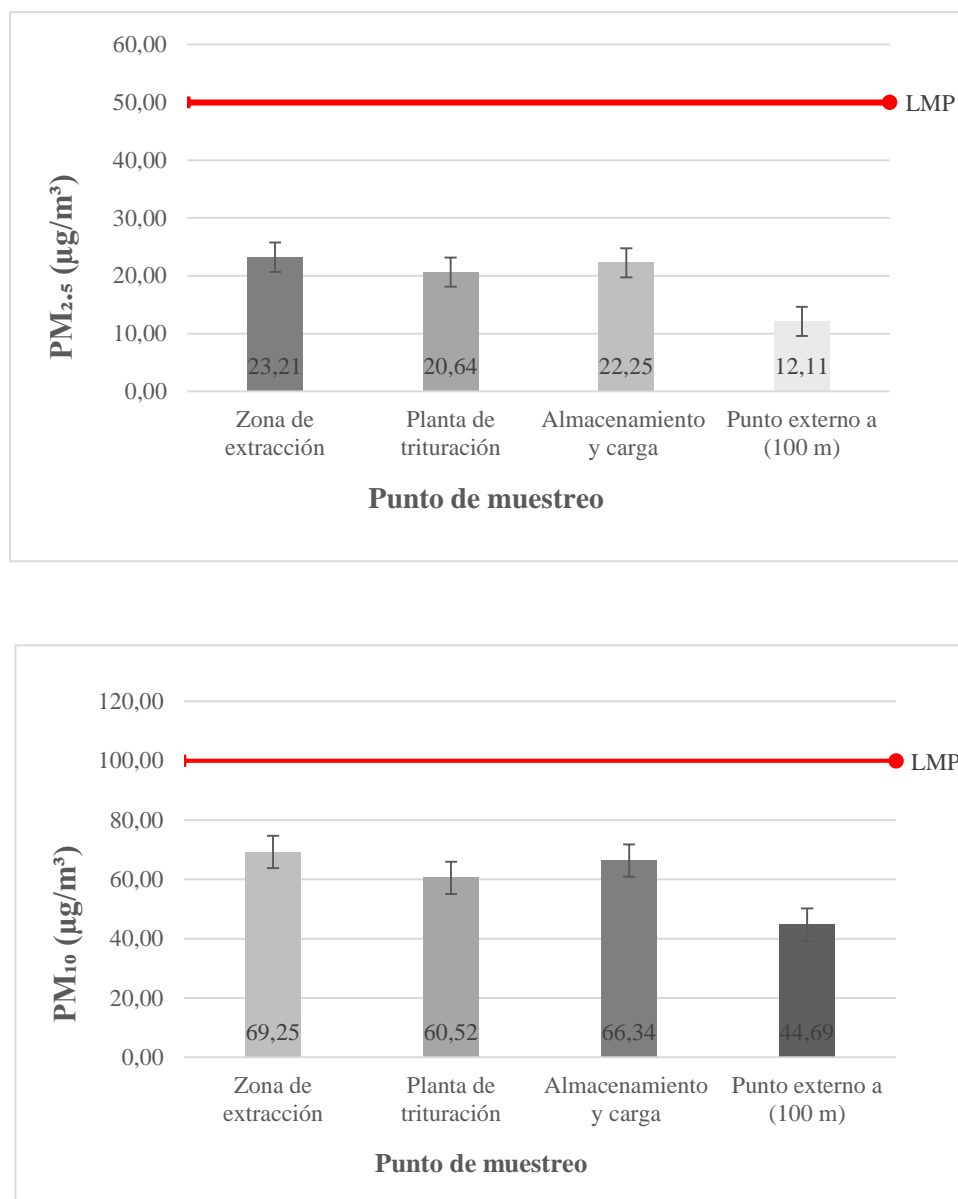
Tabla 8.*Zona con mayor carga de PM en la cantera San José*

Punto de muestreo	PM_{2.5} (µg/m³)	PM₁₀ (µg/m³)
Zona de extracción	23,21	69,25
Planta de trituración	20,64	60,52
Almacenamiento y carga	22,25	66,34
Punto externo a (100 m)	12,11	44,69

Nota. Promedios diarios de PM_{2.5} y PM₁₀ registrados durante el mes de mayo de 2025 en los puntos de monitoreo de la cantera “San José.”

Como se aprecian en la Tabla 9, estas diferencias reflejan la intensidad de las actividades realizadas en cada punto, y permiten identificar zonas críticas en términos de emisión de material particulado. Se ha observado que las zonas de extracción dentro de la cantera “San José” representan las mayores fuentes de emisión de partículas, esto se debe a la naturaleza disruptiva de las actividades, como el movimiento de tierra, el arranque mecánico de la roca durante la extracción (N. Hernández et al., 2014). En contraste, el punto de monitoreo externo a 100 metros de la cantera registra las partículas más bajas, lo que puede tener implicaciones para la calidad del aire en zonas habitadas cercanas. La investigación realizada por Paredes et al. (2024) dice que en zonas mineras han evidenciado que las emisiones de PM₁₀ pueden alcanzar concentraciones significativas en áreas residenciales cercanas, afectando la salud de las comunidades locale

Figura 7.
Promedios de $PM_{2.5}$ y PM_{10} según puntos de muestreo



Nota. Barras representativas de las concentraciones promedio de $PM_{2.5}$ y PM_{10} registradas durante el mes de mayo de 2025 en los cuatro puntos de monitoreo establecidos en la cantera “San José”. Se observa una mayor carga de material particulado en las zonas de operación minera, en contraste con el punto externo ubicado a 100 metros de la fuente emisor.

5.2.2. Análisis por horario de muestreo

Los resultados por horario muestran que las concentraciones de material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} varían según la intensidad de las actividades mineras y las condiciones ambientales. La concentración más baja se registró a las 8:00 a.m., con valores promedio de $16.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ y $56.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} . A mediodía, a las 12:00 p.m., se observaron las concentraciones máximas, alcanzando $22,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ y $63,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} . Finalmente, a las 15:00 p.m., las concentraciones disminuyeron ligeramente a $20.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($PM_{2.5}$) y $60.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (PM_{10}).

Tabla 9.

Horario con mayor carga de PM en la cantera “San José”

Horario	$PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
8:00 a. m.	16,2	56,6
12:00 p. m.	22,0	63,1
15:00 p. m.	20,5	60,6

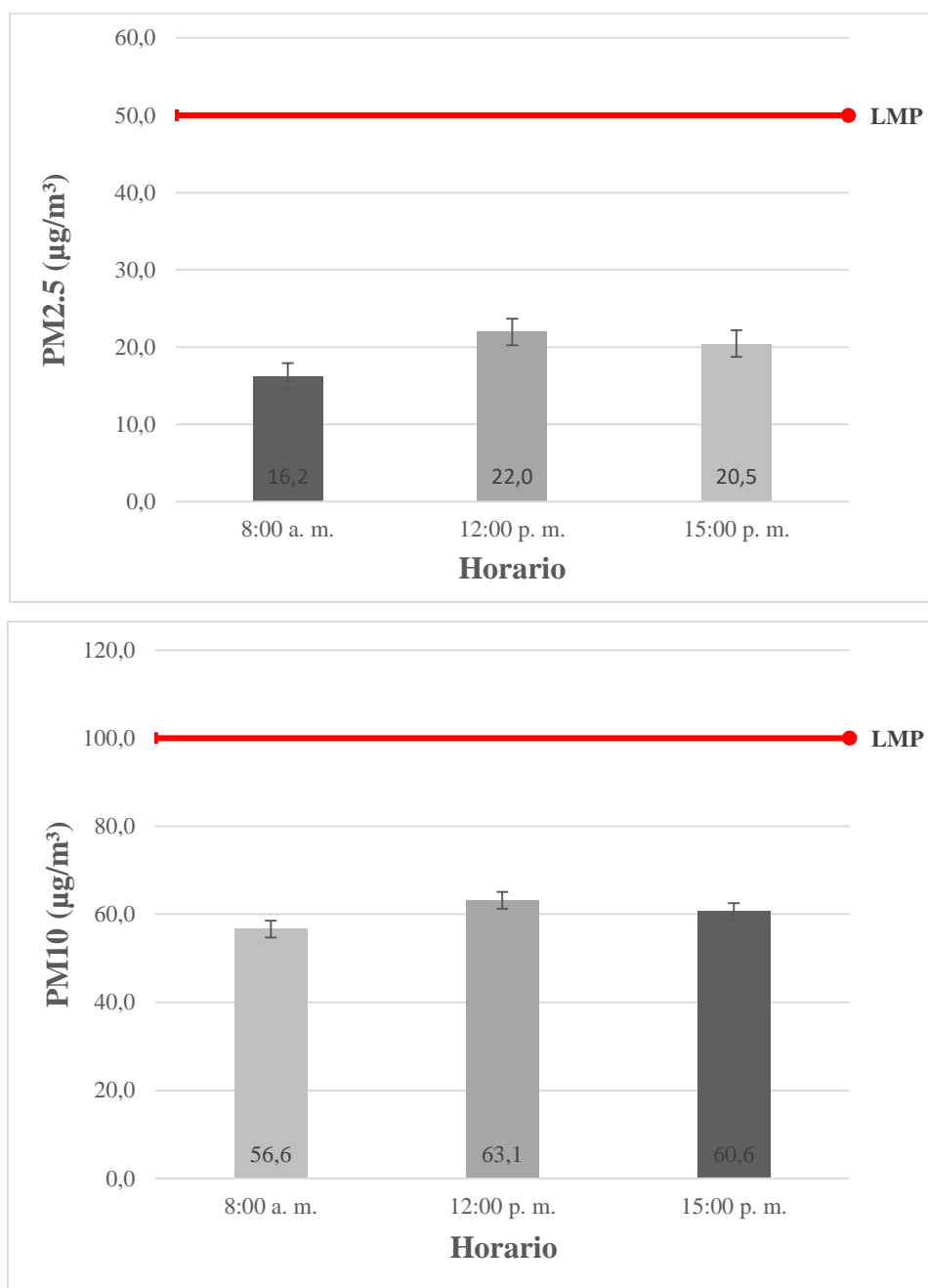
Nota. Valores promedio correspondientes a los horarios de 08:00, 12:00 y 15:00, calculados de forma general para todo el mes de monitoreo.

Como se muestra en la Tabla 10. Las concentraciones promedio más bajas del día se registraron a las 8:00 a.m. Este horario coincide con el inicio de las operaciones diarias de la cantera, donde predominan tareas preparatorias de baja intensidad, como la puesta en marcha de equipos y la organización del transporte de material. Abadi et al. (2025) afirman que las primeras horas del día suelen presentar menores niveles de material particulado debido a una menor actividad industrial, menor radiación solar y condiciones meteorológicas estables. En Ibarra, las condiciones matutinas incluyen vientos suaves (1–2 m/s) y alta humedad relativa promedio entre 70 y 80%, lo que favorece la sedimentación de partículas, en especial de PM_{10} , que es más denso y se deposita con mayor facilidad (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI], 2023).

El pico máximo de concentraciones se observa a las 12:00 p.m., con un aumento del 35.4% en $PM_{2.5}$ y 11.5% en PM_{10} en comparación con el horario de 8:00 a.m. Esta hora coincide con el mayor nivel de actividad en la cantera debido a que la maquinaria opera de forma continua para trasladar el material extraído hacia la planta de trituración, donde se separan arena y ripio. El movimiento constante de volquetas y la trituración activa generan una mayor cantidad de polvo en el aire, esta situación se intensifica debido a velocidades de viento más altas (3-5 m/s), las cuales favorecen la suspensión de partículas (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI], 2023).

Durante el horario de las 3:00 p.m., se registró una ligera reducción del 6.8 % en la concentración de $PM_{2.5}$ y del 4.0 % en PM_{10} respecto al mediodía. Aunque las actividades mineras, como la trituración y el transporte de materiales, continúan en este horario, la acumulación de partículas generadas durante el día puede mantener niveles elevados de concentración. Además, factores como la topografía del área y las condiciones atmosféricas pueden influir en la dispersión de los contaminantes, limitando su dilución en la atmósfera local (Echeverri, 2023)

Figura 8.
Comparación horaria de $PM_{2.5}$ y PM_{10} con barras de error



Nota. Barras representativas de las concentraciones promedio de $PM_{2.5}$ y PM_{10} registradas durante el mes de mayo de 2025 en los tres horarios de muestreo establecidos en la cantera “San José”. Se evidencia una mayor carga de material particulado en el horario de 12:00 p.m.

5.2.3. Análisis por horarios y zonas

El análisis de las concentraciones de material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) en la Cantera “San José” revela una clara correlación entre las zonas de muestreo, los horarios específicos y la naturaleza de las operaciones mineras. Los datos reflejan no solo la intensidad de las emisiones en la fuente, sino también los patrones de dispersión y la influencia del ciclo operativo diario. En la Tabla 11. Tenemos los promedios medidos en los tres horarios y en los cuatro puntos establecidos.

Tabla 10.

Determinación de zona y horario con mayor concentración de PM

Zona	Horario	PM_{2.5} (µg/m³)	PM₁₀ (µg/m³)
Extracción	08:00 a.m.	18.5	62.9
	12:00 p.m.	25.7	75.3
	15:00 p.m.	25.4	69.1
Planta de trituración	08:00 a.m.	18.0	61.1
	12:00 p.m.	22.1	59.0
	15:00 p.m.	21.8	61.4
Almacenamiento y carga	08:00 a.m.	17.7	63.2
	12:00 p.m.	26.4	69.2
	15:00 p.m.	22.6	66.6
Punto externo (100 m)	08:00 a.m.	10.7	39.6
	12:00 p.m.	13.6	49.0
	15:00 p.m.	12.0	45.4

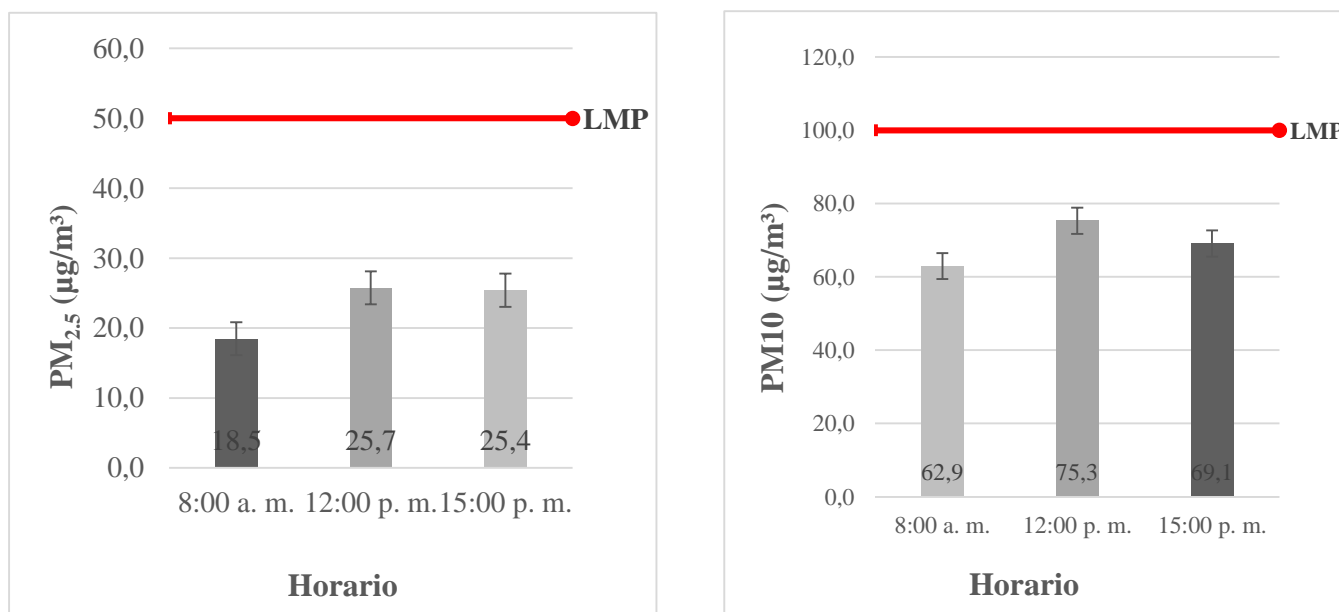
Nota. Valores promedio correspondientes a los horarios de 08:00, 12:00 y 15:00 en los diferentes puntos de muestreo calculados de forma general para todo el mes de monitoreo.

En la zona de extracción, los valores más altos se registraron en el horario de las 12:00 p.m. con valores de PM_{2.5} de 25,7 µg/m³ y de PM₁₀ con valores de 75,3 µg/m³, reflejando el funcionamiento simultáneo de retroexcavadoras que transportan material, con la consecuente liberación de polvo desde los caminos de tierra (Flores et al., 2011). En el horario de las 08:00 a.m., las concentraciones iniciales fueron de 18.5 µg/m³ para PM_{2.5} y 62.9 µg/m³ para PM₁₀ siendo estas las más bajas de esta zona, debido a que las actividades de construcción, como el movimiento

de tierra, apenas comienzan y todavía no alcanzan su máxima intensidad. Además, la alta humedad relativa en la mañana (>60%) contribuye a que las partículas del suelo se adhieran entre sí, lo que reduce su dispersión en el aire (Barraza y Sánchez, 2019).

En el horario de 15:00 pm, el nivel de PM_{10} disminuye ligeramente a $69.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, debido a su mayor velocidad de deposición seca (Serna, 2021), que facilita que las partículas más grandes se asienten rápidamente, especialmente con la presencia de vientos más intensos en la tarde. En cambio, el $PM_{2.5}$ se mantiene relativamente estable en $25.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ya que sus partículas son más pequeñas y cuentan con una velocidad de deposición mucho menor por lo cual permanecen suspendidas en el aire por mucho más tiempo (Echeverri y Maya, 2008).

Figura 9.
 $PM_{2.5}$ y PM_{10} zona de extracción por horario



Nota. Barras de error de las concentraciones promedio de $PM_{2.5}$ y PM_{10} registradas durante el mes de mayo de 2025 en la zona de extracción durante los tres horarios de muestreo establecidos en la cantera “San José”. Se evidencia una mayor carga de material particulado en el horario de 12:00 p.m.

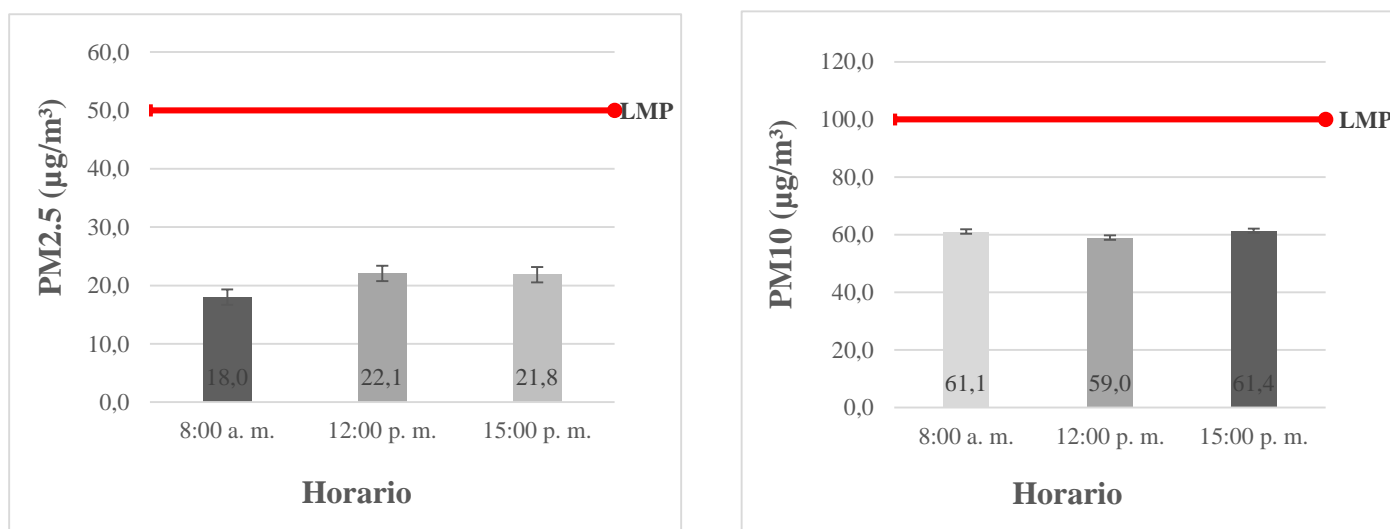
Las concentraciones horarias de contaminantes en la planta de trituración fueron relativamente constantes, en el horario de las 08:00 a.m. tenemos para $PM_{2.5}$ un valor de $18,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que para PM_{10} un valor de $61,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el horario de las 12:00 p.m. tenemos $22,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ y $59,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} , a las 15:00 p.m. tenemos $21,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ y $61,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} .

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} . Esta estabilidad sugiere una fuente continua de emisión de polvo, atribuible al proceso mecánico de trituración y cribado que se mantiene activo a lo largo de la jornada laboral sin interrupciones significativas.

Durante esta actividad, las rocas se fragmentan, lo que genera una cantidad considerable de partículas finas y gruesas, especialmente menores o iguales 10 micras, producto de la rotura y fricción de los agregados (Tiktin, 1998). Posteriormente, el material pasa al cribado, donde se separa por tamaño mediante mallas vibratorias. En esta etapa, tanto la vibración como el transporte del material generan emisiones adicionales de polvo, ya que la planta es abierta y no cuenta con sistemas de encapsulamiento.

Figura 10.

Comparación horaria de $\text{PM}_{2,5}$ y PM_{10} en planta de trituración



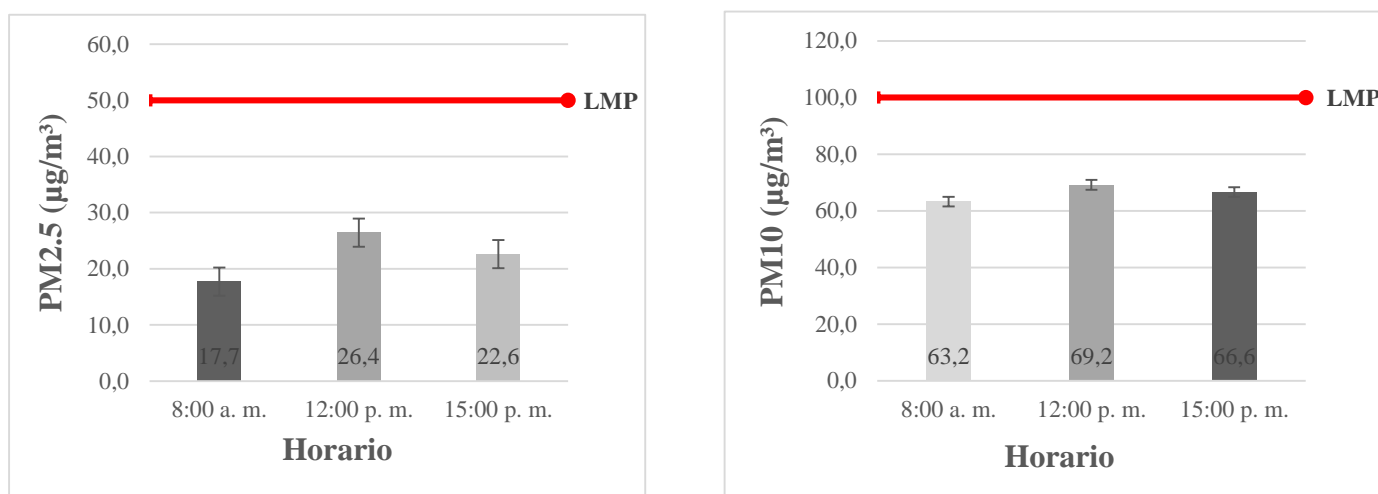
Nota. Barras de error de las concentraciones promedio de $\text{PM}_{2,5}$ y PM_{10} registradas durante el mes de mayo de 2025 en la planta de trituración durante los tres horarios de muestreo establecidos en la cantera “San José”. Se evidencia una mayor carga de material particulado en el horario de 12:00 p.m. para $\text{PM}_{2,5}$ y para PM_{10} en el horario de 15:00 p.m.

En el área de almacenamiento y carga se registró el pico más alto de material particulado durante el monitoreo, alcanzando concentraciones de $26.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2,5}$ y para PM_{10} de $69.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 12:00 p.m., superando incluso al máximo de la zona de extracción en $\text{PM}_{2,5}$. Este

incremento está directamente asociado con la intensa manipulación de áridos mediante palas cargadoras y el constante tránsito de volquetas en la superficie (Mendoza, 2020). Las operaciones de carga generan una significativa liberación de partículas finas y gruesas debido al impacto del material contra el balde de las volquetas, especialmente cuando se descarga con fuerza desde alturas considerables, lo que incrementa la energía cinética del material y la dispersión del polvo (Avellaneda, 2012). Durante el mediodía se registró el mayor movimiento de carga, lo que incrementó la emisión de material particulado en la zona de almacenamiento. Aunque a las 15:00 se observó una ligera disminución en las concentraciones de $22,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2,5}$ y $66,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} , los niveles continuaron siendo altos. Esto se debe a que la operación no se detiene, y la humedad relativa presente no fue suficiente para facilitar la caída de las partículas al suelo por aglomeración o sedimentación (Barraza y Sánchez, 2019). En consecuencia, las operaciones de carga y almacenamiento en áreas abiertas sin control generan una alta emisión de partículas.

Figura 11.

Comparación horaria de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en zona de almacenamiento/carga



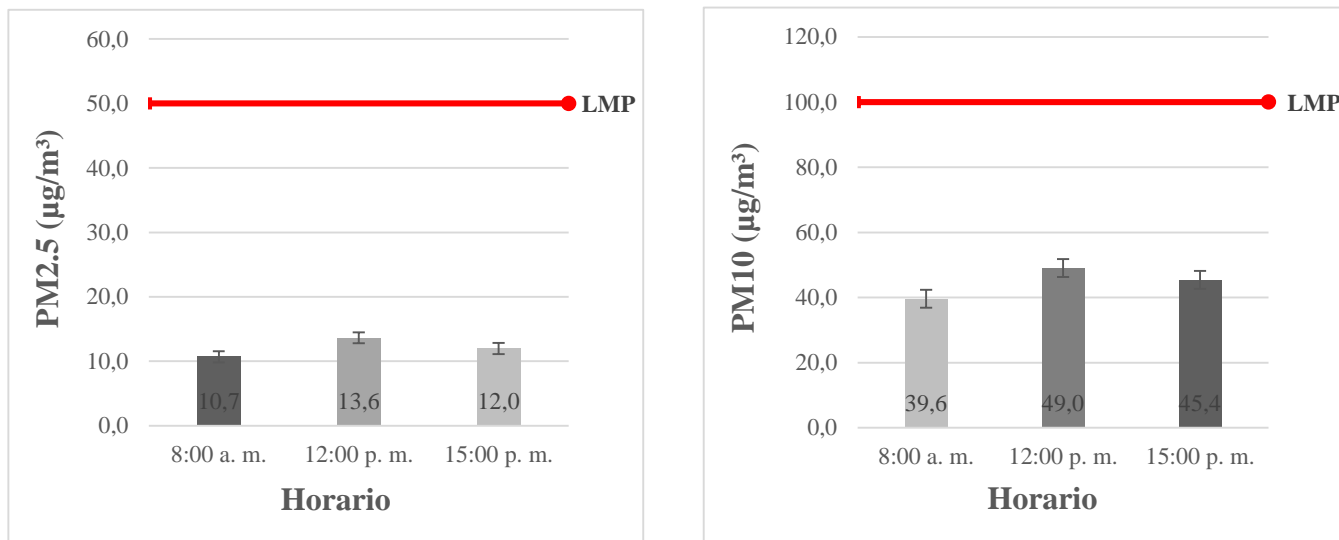
Nota. Barras de error de las concentraciones promedio de $PM_{2.5}$ y PM_{10} registradas durante el mes de mayo de 2025 en zona de carga y almacenamiento durante los tres horarios de muestreo establecidos en la cantera “San José”. Se evidencia una mayor carga de material particulado en el horario de 12:00 p.m.

El punto externo, ubicado a 100 metros en la dirección del viento dominante, mostró concentraciones reducidas de material particulado debido a los procesos naturales de dispersión y dilución atmosférica (Meléndez, 2016). Las mediciones realizadas indicaron los siguientes valores a las 08:00 a.m., 10,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ y 39,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} ; a las 12:00 p.m., 13,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ y 49,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} y a las 15:00 p.m., 12,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2.5}$ y 45,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} .

El pico máximo a 100 metros de la cantera se registró en el horario de 12:00 p.m., coincidiendo con el momento de mayor actividad operativa interna durante el mediodía. No obstante, las concentraciones en este punto externo fueron considerablemente menores a los demás procesos debido a dos factores climáticos predominantes en mayo como son la baja velocidad del viento, que oscila entre 2 y 5 m/s (NASA POWER, 2025), limitando la dispersión horizontal del polvo. La elevada humedad del material producto de las frecuentes lluvias redujeron la facilidad con la que el material se fragmenta, y, por ende, la generación de partículas en la fuente. Además, la estabilidad de la capa límite atmosférica se vuelve más neutra hacia el mediodía restringiendo el movimiento vertical del aire favoreciendo la concentración de partículas en niveles bajos.

Figura 12.

Comparación horaria de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en punto externo (100 m)



Nota. Barras de error de las concentraciones promedio de $PM_{2.5}$ y PM_{10} registradas durante el mes de mayo de 2025 en el punto de monitoreo externo a 100 metros de la cantera durante los tres horarios de muestreo establecidos en la cantera “San José”. Se evidencia una mayor carga de material particulado en el horario de 12:00 p.m.

5.2.4. Coeficiente de correlación

El coeficiente de correlación Pearson se utiliza su capacidad para cuantificar la fuerza y dirección de la relación lineal entre las concentraciones de $PM_{2.5}$ Y PM_{10} (Robles et al., 2019). El coeficiente de correlación calculado para el conjunto de datos recolectados en el mes de mayo de 2025 en la Cantera “San José” dio un valor de $r=0.696$ como se muestra en la Tabla 12, lo que representa una correlación positiva moderadamente fuerte entre las concentraciones de material particulado fino ($PM_{2.5}$) y grueso (PM_{10}) (Martínez et al., 2009).

Tabla 11.

Coefficiente de regresión global entre $PM_{2.5}$ y PM_{10}

	$PM_{2.5} (\mu\text{g}/\text{m}^3)$	$PM_{10} (\mu\text{g}/\text{m}^3)$
$PM_{2.5} (\mu\text{g}/\text{m}^3)$	1	
$PM_{10} (\mu\text{g}/\text{m}^3)$	0,695	1

Nota. Coeficiente de Correlación de Pearson entre $PM_{2.5}$ y PM_{10} en la cantera “San José”
Correlación positiva moderada ($r=0.696$), indicando que ambas fracciones tienden a incrementarse conjuntamente.

Este resultado evidencia de que ambas fracciones de partículas tienden a incrementarse conjuntamente, aunque no de forma perfectamente proporcional. Esto se debe a que $PM_{2.5}$ forma parte de PM_{10} , por lo que al aumentar la cantidad de PM_{10} , también aumenta la presencia de partículas más finas (Cáceres, 2018). Esta relación se explica por el origen común de las emisiones principalmente en procesos como fricción, trituración, impacto y manipulación de materiales, así como por las características físicas compartidas y las condiciones operativas constantes en la cantera “San José” durante el periodo analizado.

En la cantera “San José”, las partículas son generadas principalmente por actividades mecánicas tales como la remoción de material por retroexcavadora desde taludes superiores, la descarga en niveles inferiores, la trituración en planta y el transporte mediante palas cargadoras hacia las zonas de almacenamiento. Cada una de estas etapas generan tanto partículas gruesas como finas, permitiendo que exista una correspondencia directa en sus concentraciones.

Además, el valor de $r = 0.696$ refleja condiciones operativas estables durante el periodo de monitoreo en la cantera “San José”, sin variaciones significativas en los procesos internos de producción. Esta estabilidad favoreció la linealidad entre ambas fracciones, ya que el sistema de emisión no sufrió alteraciones drásticas, permitiendo un comportamiento coherente entre $PM_{2.5}$ y PM_{10} . Un valor de correlación negativo habría indicado una relación débil o inversa, lo cual no sería compatible con la naturaleza del material particulado.

5.2.5 Regresión lineal para predecir concentraciones de material particulado

El análisis de regresión lineal realizado para evaluar la relación entre las concentraciones de material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} en la cantera “San José” arrojó un coeficiente de correlación múltiple de $r=0.696$, indicando una relación positiva moderada a fuerte entre ambas variables (Martínez et al., 2009). El coeficiente de determinación $R^2= 0.48$ muestra que aproximadamente el 48.4% de la variabilidad en las concentraciones de PM_{10} puede ser explicada por las concentraciones de $PM_{2.5}$, esto evidencia una relación estadística considerable entre ambas fracciones. Esta correlación sugiere que al implementar medidas de control sobre $PM_{2.5}$, también se estarían generando efectos positivos en la reducción de PM_{10} , lo cual resulta estratégico para la gestión integral de la calidad del aire en entornos mineros e industriales (Acosta et al., 2019).

Tabla 12.

Estadísticas del modelo de regresión lineal de la cantera “San José”

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,695
Coeficiente de determinación R^2	0,484
R^2 ajustado	0,481
Error típico	7,851
Observaciones	192

Nota. Análisis de regresión lineal de PM_{10} en función de $PM_{2,5}$ realizado en Excel.

El análisis de varianza (ANOVA) indicó un valor F calculado de 178.28, el cual es muy superior al valor crítico de F que tiene un nivel de significancia extremadamente bajo de $4.09 \cdot 10^{-29}$. Esto confirma que existe una relación fuerte y estadísticamente significativa entre $PM_{2.5}$ y PM_{10} en la cantera San José, evidenciando una dependencia robusta entre ambas variables.

Tabla 13.*Análisis de varianza de la cantera “San José”*

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	10991,261	10991,261	178,280	4,0899E-29
Residuos	190	11713,758	61,651		
Total	191	22705,019			

Nota. Análisis de varianza (ANOVA), el valor calculado de $F=178,28$ es mucho mayor que el valor crítico de $F=4,09 \cdot 10^{-29}$, lo que indica que el modelo de regresión es estadísticamente significativo y explica bien la variabilidad de los datos.

En cuanto a los coeficientes, la intersección del modelo es de $-0,352 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con un margen de error de 1,595. Esto significa que, teóricamente, cuando la concentración de $\text{PM}_{2,5}$ es cero, el modelo predice un valor muy bajo de PM_{10} . Sin embargo, este resultado no es estadísticamente significativo porque su valor de probabilidad $p=0,825$, mucho mayor al límite común de 0,05, lo que indica que puede deberse al azar.

Por otro lado, la pendiente de la regresión es de $0,331 \mu\text{g}/\text{m}^3$ por cada unidad de $\text{PM}_{2,5}$, con un margen de error pequeño (0,025) y un valor p extremadamente bajo ($4,09 \times 10^{-29}$), lo que confirma que sí hay una relación real entre ambas variables. Esto significa que por cada incremento de $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de $\text{PM}_{2,5}$, se espera un aumento promedio de $0,331 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de PM_{10} . Esta relación se debe a que ambas fracciones suelen generarse simultáneamente en actividades como la trituración, carga y transporte de material en la cantera, lo que hace que aumenten juntas.

Tabla 14.

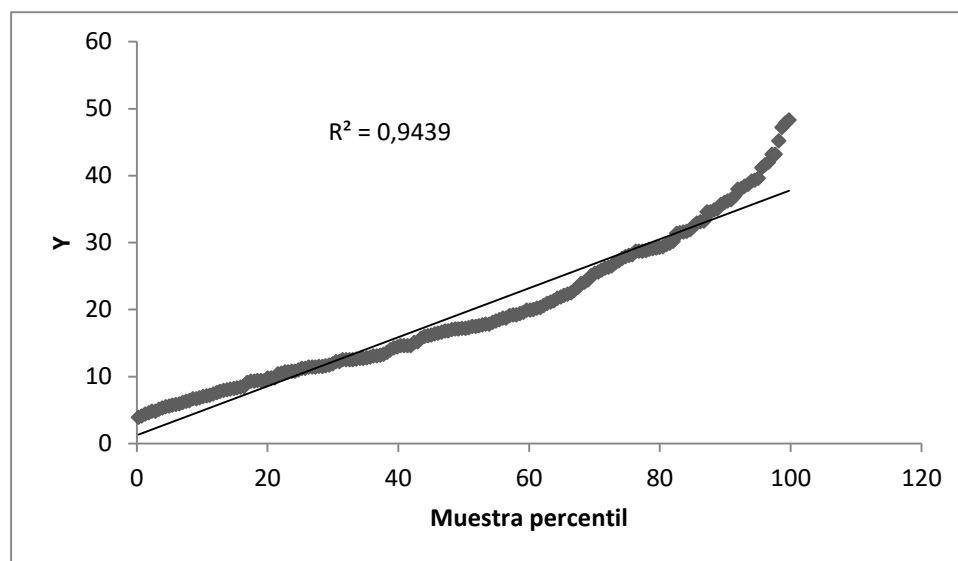
Coefficiente de regresión global entre $PM_{2.5}$ y PM_{10}

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	-0,352	1,595	-0,221	0,825	-3,498	2,793	-3,498	2,793
Variable X 1	0,331	0,025	13,352	0,000	0,282	0,380	0,282	0,380

Nota. La tabla muestra los coeficientes del modelo de regresión lineal. $PM_{2.5}$ presenta una relación significativa con PM_{10} , mientras que la intercepción no es estadísticamente significativa en la cantera “San José”.

Figura 13.

Gráfico de probabilidad normal para la regresión de $PM_{2.5}$ y PM_{10}



Nota. Gráfico de probabilidad normal para la regresión de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en la semana uno. La línea de tendencia muestra un $R^2=0.9772$, indicando un ajuste casi perfecto a una distribución normal de los residuos.

5.2.6 Análisis de regresión lineal por semanas

Con el objetivo de identificar con mayor precisión el comportamiento de material particulado en la cantera “San José” durante el mes de mayo de 2025, se realizó un análisis de regresión lineal entre $PM_{2.5}$ y PM_{10} por semanas. Este enfoque permite realizar una comparación detallada de como varia la relación entre ambos contaminantes a lo largo del tiempo considerando a $PM_{2.5}$ como variable independiente y PM_{10} como variable dependiente. Además, incorporaremos la precipitación diaria como un factor meteorológico relevante que puede influir en esta relación (Cuadros, 2021).

Tabla 15.*Precipitación diaria en la cantera “San José”, mayo 2025*

Día	Precipitación (mm)	Valor gráfico de precipitación diaria
1	1.5	Lluvia ligera
2	2.0	Lluvia moderada
3	0.5	Lluvia leve
4	0.0	Sin lluvia
5	4.0	Lluvia importante
6	0.0	Sin lluvia
7	0.0	Sin lluvia
8	2.0	Lluvia ligera
9	7.0	Lluvia fuerte
10	6.0	Lluvia considerable
11	4.5	Lluvia moderada
12	3.5	Lluvia moderada
13	0.0	Sin lluvia
14	0.0	Sin lluvia
15	2.5	Lluvia ligera
16	1.0	Lluvia leve
17	1.5	Lluvia ligera
18	2.0	Lluvia ligera
19	0.5	Lluvia muy leve
20	0.0	Sin lluvia
21	0.0	Sin lluvia
22	0.0	Sin lluvia
23	0.0	Sin lluvia
24	0.0	Sin lluvia
25	0.0	Sin lluvia
26	0.0	Sin lluvia
27	0.0	Sin lluvia
28	0.0	Sin lluvia
29	0.0	Sin lluvia
30	0.5	Lluvia leve
31	2.5	Lluvia moderada

Nota. Los datos de precipitación diaria para el mes de mayo de 2025 en la cantera “San José” fueron obtenidos de la plataforma meteorológica (MeteoBlue AG, 2025) .

En la semana uno se registró la relación más débil entre $PM_{2.5}$ y PM_{10} , con el valor más bajo tanto del coeficiente de correlación ($R= 0,478$) como del coeficiente de determinación ($R^2= 0,228$), lo que indica que el 22,8 % de la variabilidad de PM_{10} fue explicada por $PM_{2.5}$ en la primera semana.

Tabla 16.

Estadística de regresión-semana 1

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,477
Coeficiente de determinación R^2	0,228
R^2 ajustado	0,211
Error típico	5,553
Observaciones	48

Nota. Estadísticas de la regresión lineal de PM_{10} en función de $PM_{2.5}$ realizado en Excel.

El análisis de varianza (ANOVA) arrojó un valor F de 13.59, mientras que el valor crítico de F fue 0.0006, lo que reafirma la significancia del modelo de regresión.

Tabla 17.

Análisis de varianza-semana 1

	<i>Grados de libertad</i>	<i>de Suma de cuadrados</i>	<i>de Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	419,167	419,167	13,593	0,001
Residuos	46	1418,469	30,836		
Total	47	1837,636			

Nota. Análisis de varianza (ANOVA) el valor calculado de $F=13,59$ es mucho mayor que el valor crítico de $F=0.001$, lo que indica que el modelo de regresión es estadísticamente significativo.

Este bajo coeficiente de determinación dictamina que la relación entre ambas fracciones fue débil y que otros factores influyeron significativamente en las concentraciones observadas. La pendiente de la regresión fue de 0.144 la más baja del análisis, el error típico fue de 0.039, un estadístico t de 3.69, y un intervalo de confianza al 95 % que va de 0.065 a 0.223. Este análisis revela que por cada unidad de incremento en $PM_{2.5}$ el PM_{10} aumenta en menor proporción respecto a las semanas siguientes.

Esta débil relación está directamente relacionada con la alta frecuencia e intensidad de las lluvias, ya que se registraron precipitaciones en tres de los cuatro días de muestreo, con eventos significativos de 2.0, 6.0 y 4.5 mm (MeteoBlue AG, 2025). La precipitación actúa como un mecanismo de lavado atmosférico reduce la concentración de partículas gruesas (PM_{10}), mientras que las partículas finas permanecen más tiempo en suspensión, afectando así la proporcionalidad entre ambas fracciones. Como resultado, el cociente $PM_{2.5}$ sobre PM_{10} aumenta y la relación lineal se debilita. A pesar del bajo coeficiente de determinación, el valor $p=0.0006$ demuestra que la relación observada fue estadísticamente significativa.

Tabla 18.

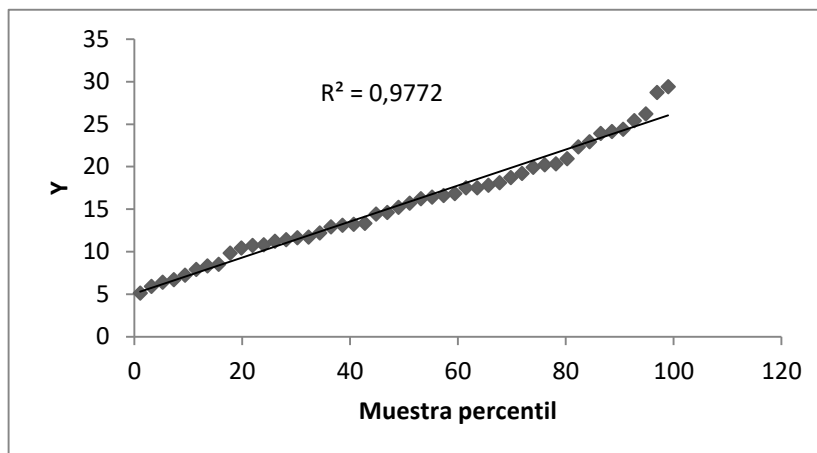
Coefficientes del modelo de regresión lineal- semana 1

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	7,172	2,437	2,942	0,005	2,266	12,078	2,266	12,078
Variable X 1	0,144	0,039	3,687	0,001	0,065	0,223	0,065	0,223

Nota. La tabla muestra los coeficientes del modelo de regresión lineal. $PM_{2.5}$ presenta una relación significativa con PM_{10} , mientras que la intercepción no es estadísticamente significativa en la cantera “San José”.

Figura 14.

Probabilidad normal de la regresión de $PM_{2.5}$ y PM_{10} -Semana 1



Nota. Gráfico de probabilidad normal para la regresión de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en la semana uno. La línea de tendencia muestra un $R^2=0.9772$, indicando un ajuste casi perfecto a una distribución normal de los residuales.

En la semana dos la correlación mejoró con un coeficiente de correlación de $R=0.623$ y el coeficiente de determinación aumento a $R^2=0.388$ lo que indica que el 38,8% de variabilidad del PM_{10} fue explicada por el $PM_{2.5}$.

Tabla 19.

Estadística de regresión- semana 2

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,623
Coefficiente de determinación R^2	0,388
R^2 ajustado	0,375
Error típico	5,742
Observaciones	48

Nota. Estadísticas de la regresión lineal de PM_{10} en función de $PM_{2.5}$ realizado en Excel.

El análisis de varianza (ANOVA) muestra un valor F de 29.21, que supera ampliamente el valor crítico de F de 2.23617×10^{-6} reafirmando la significancia del modelo de regresión.

Tabla 20.

Análisis de varianza- semana 2

	<i>Grados de libertad</i>	<i>de Suma de cuadrados</i>	<i>de Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	962,977	962,977	29,209	2,23617E-06
Residuos	46	1516,542	32,968		
Total	47	2479,519			

Nota. Análisis de varianza (ANOVA) el valor calculado de $F=29.21$ es mucho mayor que el valor crítico de $F=2.24 \times 10^{-6}$, lo que indica que el modelo de regresión es estadísticamente significativo y explica bien la variabilidad de los datos.

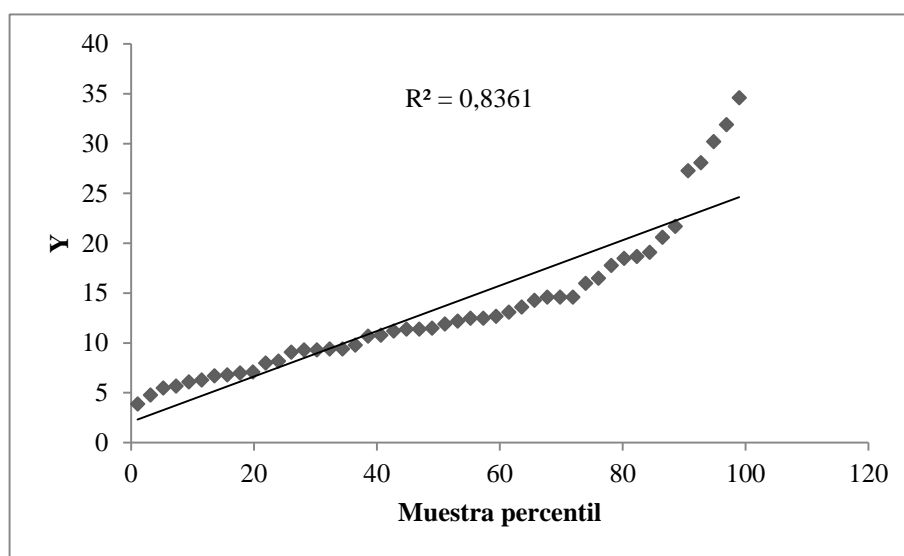
Desde el punto de vista meteorológico, la Semana 2 presentó un patrón mixto, con dos eventos de lluvia no consecutivos, con precipitaciones de 3.5 mm el día 12 y 2.0 mm el día 18. La alternancia entre días secos y húmedos generó cierta variabilidad en las concentraciones de partículas, lo que pudo limitar el fortalecimiento de la correlación lineal. Sin embargo, la relación observada se mantiene estable.

El coeficiente de la variable X1 es de 0.204 con un error típico de 0.038, un estadístico t de 5.40 y un valor de probabilidad de 2.23617×10^{-6} , lo que indica que la relación entre $PM_{2.5}$ y PM_{10} es estadísticamente significativa. La intercepción tiene un coeficiente de 3.065 con un error típico de 2.098, un estadístico t de 1.46 y un valor de probabilidad de 0.15, lo que sugiere que no es significativa. Los intervalos de confianza al 95% para la variable X1 van de 0.128 a 0.280.

Tabla 21.*Coefficientes del modelo de regresión lineal - semana 2*

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	3,065	2,098	1,461	0,151	-1,157	7,287	-1,157	7,287
Variable X 1	0,204	0,038	5,405	0,000	0,128	0,280	0,128	0,280

Nota. La tabla muestra los coeficientes del modelo de regresión lineal. $PM_{2.5}$ presenta una relación significativa con PM_{10} , mientras que la intercepción no es estadísticamente significativa en la cantera “San José”.

Figura 15.*Probabilidad normal para la regresión de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en la semana 2*

Nota. Gráfico de probabilidad normal para la regresión de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en la semana dos. La línea de tendencia muestra un $R^2 = 0,8361$, indicando un ajuste casi perfecto a una distribución normal de los residuales.

La semana tres presento la correlación más alta del estudio, con un coeficiente de $R=0,875$

y un coeficiente de determinación de $R^2=0,766$, lo que indica que la variable del PM10 fue explicada por el PM_{2,5} en un 76%.

Tabla 22.

Estadística de regresión- semana 3

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,875
Coeficiente de determinación R^2	0,766
R^2 ajustado	0,760
Error típico	4,675
Observaciones	48

Nota. Estadísticas de la regresión lineal de PM₁₀ en función de PM_{2,5} realizado en Excel.

El análisis de varianza (ANOVA) muestra un valor de F de 150,213, el valor crítico de F fue extremadamente bajo con un valor de $4.3 \cdot 10^{-16}$ afirmando la alta significancia estadística del modelo de regresión aplicado.

Tabla 23.

Análisis de varianza- semana 3

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	3283,285	3283,286	150,214	4,30656E-16
Residuos	46	1005,441	21,857		
Total	47	4288,727			

Nota. Análisis de varianza (ANOVA) el valor calculado de $F=150,21$ es mucho mayor que el valor crítico de $F=4.3 \cdot 10^{-16}$, lo que indica que el modelo de regresión es estadísticamente significativo

y explica bien la variabilidad de los datos.

Respecto a los coeficientes del modelo, la pendiente de regresión fue mayor con un valor de 0,441, esto se debe a que en esta semana predominó un clima seco con una ligera llovizna de 0,5 mm que no afectó el patrón general revelando una alta sensibilidad del PM_{10} ante cambios de $PM_{2.5}$. Estas condiciones favorecieron la estabilidad atmosférica y permitieron que ambos contaminantes se comportaran en conjunto reforzando una relación lineal. El estadístico t es de 12.26 y un valor-p extremadamente bajo (4.31×10^{-16}), lo que reafirma la relación estadísticamente significativa entre ambas variables, el intervalo de confianza al 95% para la pendiente se sitúa entre 0.369 y 0.514, lo que indica una alta precisión del modelo. Por otro lado, la intercepción tuvo un coeficiente de -1.404, con un error estándar de 2.69, un estadístico t de -0.52 y un valor p de 0.60, indicando que no es estadísticamente significativa.

Tabla 24.

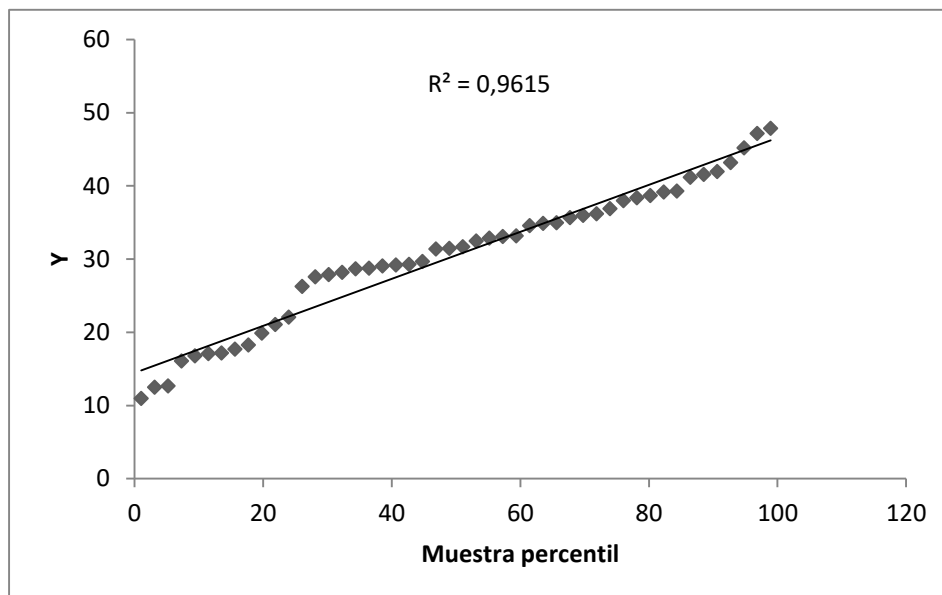
Coefficientes del modelo de regresión lineal - semana 3

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	3,065	2,098	1,461	0,151	-1,157	7,287	-1,157	7,287
Variable X 1	0,204	0,038	5,405	0,000	0,128	0,280	0,128	0,280

Nota. La tabla muestra los coeficientes del modelo de regresión lineal. $PM_{2.5}$ presenta una relación significativa con PM_{10} , mientras que la intercepción no es estadísticamente significativa en la cantera “San José”.

Figura 16.

Probabilidad normal para la regresión de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en la semana 3



Nota. Gráfico de probabilidad normal para la regresión de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en la semana tres. La línea de tendencia muestra un $R^2 = 0,9615$, indicando un ajuste casi perfecto a una distribución normal de los residuales.

En la semana cuatro, la relación entre $PM_{2.5}$ y PM_{10} mostró una correlación moderadamente fuerte, con un coeficiente de correlación múltiple de 0.677, mientras que el coeficiente de determinación R^2 fue de 0.459, lo que indica que el 45.9 % de la variabilidad del PM_{10} fue explicada por el $PM_{2.5}$.

Tabla 25.

Estadística de regresión- semana 4

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,677
Coeficiente de determinación R^2	0,459
R^2 ajustado	0,447
Error típico	8,246
Observaciones	48

Nota. Estadísticas de la regresión lineal de PM_{10} en función de $PM_{2.5}$ realizado en Excel.

El análisis de varianza (ANOVA) arrojó un valor F de 39.03, notablemente superior al valor crítico de 1.23×10^{-7} , lo que confirma que el modelo de regresión es estadísticamente significativo.

Tabla 26.

Análisis de varianza- semana 4

	<i>Grados de libertad</i>	<i>de Suma de cuadrados</i>	<i>de Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	2654,083	2654,083	39,028	1,2322E-07
Residuos	46	3128,197	68,004		
Total	47	5782,28			

Nota. Análisis de varianza (ANOVA) el valor calculado de $F=39,02$ es mucho mayor que el valor crítico de $F=1.23 \times 10^{-7}$, lo que indica que el modelo de regresión es estadísticamente significativo y explica bien la variabilidad de los datos.

El coeficiente de regresión para la variable X1 fue de 0.304, con un error típico de 0.049, un estadístico t de 6.25 y un valor p de 1.23×10^{-7} , lo que demuestra una asociación significativa y confiable entre ambas fracciones de material particulado. El intervalo de confianza al 95 % para este coeficiente se sitúa entre 0.206 y 0.402, evidenciando una estimación precisa del modelo. En contraste, la intercepción tuvo un coeficiente de 0.861, con un error estándar de 3.071, un estadístico t de 0.28 y un valor p de 0.78, lo que indica que no es estadísticamente significativa.

Tabla 27.

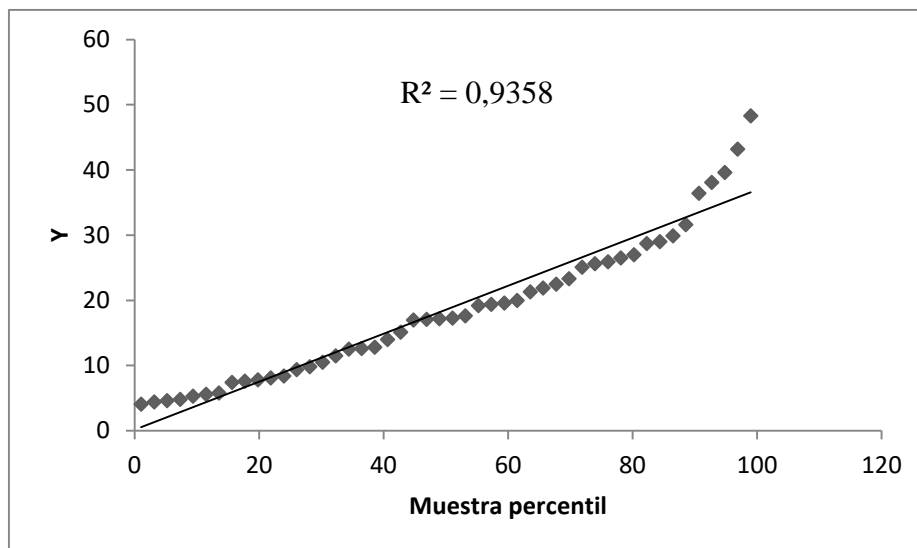
Coefficientes del modelo de regresión lineal - semana 4

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>	<i>Inferior 95,0%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	0,861	3,071	0,280	0,780	-5,321	7,044	-5,321	7,044
Variable X 1	0,304	0,049	6,247	0,000	0,206	0,402	0,206	0,402

Nota. La tabla muestra los coeficientes del modelo de regresión lineal. PM_{2.5} presenta una relación significativa con PM₁₀, mientras que la intercepción no es estadísticamente significativa en la cantera “San José”.

Figura 17.

Probabilidad normal para la regresión de PM_{2.5} y PM₁₀ en la semana 4



Nota. Gráfico de probabilidad normal para la regresión de PM_{2.5} y PM₁₀ en la semana tres. La línea de tendencia muestra un $R^2 = 0,9358$, indicando un ajuste casi perfecto a una distribución normal de los residuales.

5.3. Cumplimiento de la normativa nacional de calidad del aire

Para verificar si las concentraciones de material particulado se ajustan a la normativa

nacional, se utilizó como referencia el Acuerdo Ministerial 097 del (Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica [MAATE], 2017), el cual establece los siguientes límites máximos permisibles para una exposición de 24 horas:

- $PM_{2.5}$: $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$
- PM_{10} : $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$

Durante las cuatro semanas de monitoreo en la cantera “San José”, se calcularon los promedios diarios para cada fracción particulada como podemos ver en la Tabla 29.

Tabla 28.

Cumplimiento de la normativa nacional para $PM_{2.5}$ y PM_{10}

Fecha	Promedio diario $PM_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Normativa $PM_{2.5}$ (24h) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Cumple/ No cumple	Promedio diario PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Normativa PM_{10} (24h) ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Cumple/ No cumple
7/5/2025	17,8	50	Cumple	68,2	100	Cumple
8/5/2025	19,4	50	Cumple	71,3	100	Cumple
10/5/2025	16,4	50	Cumple	65,6	100	Cumple
11/5/2025	9,1	50	Cumple	30,6	100	Cumple
12/5/2025	16,9	50	Cumple	57,3	100	Cumple
13/5/2025	13,2	50	Cumple	53,2	100	Cumple
14/5/2025	14,2	50	Cumple	58,4	100	Cumple
18/5/2025	9,6	50	Cumple	35,4	100	Cumple
19/5/2025	31,4	50	Cumple	72,3	100	Cumple
20/5/2025	30,4	50	Cumple	72,6	100	Cumple
21/5/2025	29,4	50	Cumple	67,9	100	Cumple
22/5/2025	30,9	50	Cumple	76,7	100	Cumple
26/5/2025	14,0	50	Cumple	41,4	100	Cumple
27/5/2025	16,1	50	Cumple	60,3	100	Cumple
29/5/2025	20,1	50	Cumple	71,6	100	Cumple
31/5/2025	24,1	50	Cumple	59,7	100	Cumple

Nota. Límite Máximo Permisible según el (Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica [MAATE], 2017). Todos los valores registrados de $PM_{2.5}$ y PM_{10} durante el periodo de monitoreo cumplieron con la normativa nacional de calidad del aire para 24 horas.

Los resultados muestran que todos los valores promedio diarios se encuentran por debajo de los límites establecidos, tanto para PM_{2.5} como para PM₁₀. Por tanto, se concluye que la calidad del aire registrada cumple con la normativa ecuatoriana vigente para el periodo evaluado.

5.4. Proyección de escenario crítico de dispersión de material particulado

El monitoreo en la cantera “San José” se realizó durante la temporada lluviosa, por lo que las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀ se vieron reducidas debido a la humedad y las precipitaciones. Sin embargo, el estudio de (Hassan et al., 2024) indican que el material partícula puede llegar a aumentar significativamente hasta un 70%.

Con base en estudios que evidencian incrementos de hasta un 70 % en las concentraciones de material particulado durante los meses secos, se planteó un escenario crítico para evaluar el comportamiento de las emisiones en condiciones más severas. Para ello, se tomaron como referencia las concentraciones promedio medidas en la cantera “San José” durante mayo de 2025 (19.6 µg/m³ para PM_{2.5} y 60.2 µg/m³ para PM₁₀), mes correspondiente a la temporada lluviosa. Estas concentraciones fueron incrementadas en un 70 % para simular las condiciones atmosféricas del mes de agosto de 2024, caracterizado por su clima seco, ausencia de precipitaciones y mayor potencial de re-suspensión y dispersión de partículas. De esta forma, se modelaron las emisiones bajo un escenario representativo del periodo más crítico en términos de calidad del aire.

La masa total emitida se calculó aplicando el principio físico de conservación de masa, expresado por la ecuación (Galagovsky et al., 2015):

$$m = C * Q * T$$

- M es la masa total emitida (kg),
- C es la concentración promedio del contaminante en kg/m³,
- Q es el flujo volumétrico de aire sobre la cantera (m³/s),
- T es el tiempo total considerado (s).

El flujo volumétrico de aire se calculó como:

$$Q = A * V$$

- A= Área de la cantera (50,000 m²) (Flores, 2019)
- V=3.61 m/s la velocidad promedio del viento en el mes de agosto del 2024 (13 km/h) (MeteoBlue AG, 2025)

$$Q = 50.000 \text{ m}^2 * 3.61 \text{ m/s} = 180.500 \text{ m}^3/\text{s}$$

El tiempo total para agosto fue considerado como:

$$T = 31 \text{ días} * \frac{24 \text{ horas}}{\text{día}} * 3600 \frac{\text{s}}{\text{horas}} = 2,678,400 \text{ s}$$

Cálculo de concentraciones ajustadas

Las concentraciones medidas en mayo se ajustaron para agosto mediante:

$$C_{ajustado} = C_{mayo} * (1,7)$$

$$PM_{2.5} = 19.6 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3 * 1.70 = 3.332 * 10^{-8} \text{ Kg}/\text{m}^3$$

$$PM_{10} = 60.2 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3 * 1.70 = 1.0234 * 10^{-7} \text{ Kg}/\text{m}^3$$

Se aplicó un factor de 1.7 para simular condiciones críticas de agosto, considerando un aumento del 70% en PM por ausencia de lluvia y mayor suspensión en época seca, el programa nos pedía en Kg/m^3 así que pasamos a convertirlo

Cálculo de la masa total emitida mensual

Aplicando la fórmula general:

$$m = C * Q * T$$

$$PM_{2.5} = 3.332 * 10^{-8} \text{ Kg}/\text{m}^3 * 180,500 \text{ m}^3/\text{s} * 2,678,400 \text{ s} = 16,062.4 \text{ Kg}$$

$$PM_{10} = 1.0234 * 10^{-7} \text{ Kg}/\text{m}^3 * 180,500 \text{ m}^3/\text{s} * 2,678,400 \text{ s} = 49,465.2 \text{ Kg}$$

Adaptación para simulación de 24 horas

Dado que el modelo de dispersión atmosférica utilizado solo permite simulaciones de máximo 24 horas, las emisiones mensuales se dividieron para obtener emisiones diarias promedio:

$$m_{diario} = \frac{m_{mensual}}{31}$$

$$m_{diario,PM2.5} = 16,062.4 = 518.14 \text{ kg}/\text{día}$$

$$m_{diario,PM10} = 49,381.4 = 1592.6 \text{ kg}/\text{día}$$

Estos valores representan la masa emitida estimada durante un día de agosto del año 2025 donde no se encuentran precipitaciones, adecuada para el análisis de dispersión.

Durante el análisis del escenario crítico correspondiente al mes de agosto, caracterizado

por condiciones secas y ausencia de precipitaciones, las concentraciones diarias simuladas de material particulado fueron de 33,32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y 102,34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} . De acuerdo con el Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica [MAATE] (2017), los límites máximos permisibles (LMP) diarios para estas fracciones son 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$ y 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} . En este contexto, la concentración de $\text{PM}_{2.5}$ se encuentra por debajo del límite normativo, lo que indica una carga baja a moderada y un riesgo ambiental controlado para la salud pública. Al clasificar la carga diaria en función de la normativa vigente, se establece que $\text{PM}_{2.5}$ corresponde a una carga baja a moderada, mientras que la concentración de PM_{10} se ubica en el rango de carga alta. Esto significa que, aunque la fracción fina no representa un riesgo inmediato, la fracción gruesa sí configura un episodio de superación normativa. Este comportamiento se explica por las condiciones secas y la ausencia de lluvias en agosto, que favorecieron la re-suspensión de polvo y aumentaron principalmente las concentraciones de PM_{10} .

No obstante, la concentración simulada de PM_{10} excede ligeramente el límite legal, representando una carga alta que se traduce en un episodio de superación normativa. Esta situación conlleva riesgos significativos, especialmente para poblaciones vulnerables como niños, adultos mayores y personas con enfermedades respiratorias o cardiovasculares (Ballester, 2005). Además, las elevadas concentraciones de PM_{10} pueden generar impactos negativos en el ambiente, tales como reducción de la visibilidad, deterioro de ecosistemas y contaminación de suelos y fuentes hídricas (Romero et al., 2006).

Frente a la superación del límite legal, la normativa vigente exige la implementación de planes de alerta y emergencia que contemplen medidas específicas para la mitigación del polvo, tales como la restricción temporal de actividades mineras, el riego periódico de vías no pavimentadas para reducir la re-suspensión de polvo, y el control efectivo de emisiones fugitivas (Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica [MAATE], 2017). En la cantera “San José” estas medidas se aplican en la temporada de verano donde se realiza riego periódico de vías con un tanque remolque, para lo cual se cuenta con un permiso eventual, los conductores de volquetas están obligados a cubrir la carga para evitar la dispersión de polvo; y aunque el asfaltado parcial de la vía es una alternativa explorada, el riego con agua continúa siendo la principal estrategia para mitigar la generación de polvo y reducir molestias a la comunidad (Flores, 2019).

5.4.1. Dispersión de PM_{2.5} desde la cantera San José mediante HYSPLIT

La simulación de la dispersión del material particulado fino (PM_{2.5}) desde la cantera “San José”, realizada mediante el modelo HYSPLIT y documentada en el archivo de resultados, arrojó una proyección detallada de concentraciones horarias durante un período continuo de 24 horas, comprendido entre las 17:00 UTC (12:00 p.m.) del 1 de agosto y las 17:00 UTC (12:00 p.m.) del 2 de agosto de 2024. La liberación del contaminante se inició a las 17:00 UTC del 1 de agosto, bajo condiciones meteorológicas secas y con una velocidad de viento promedio de 3.61 m/s, utilizando una tasa de emisión diaria de 518.14 kg.

Aunque la simulación mostró una dispersión amplia del contaminante, alcanzando incluso zonas al norte del Ecuador e ingresando al territorio colombiano, es importante resaltar que el modelo HYSPLIT opera bajo condiciones idealizadas. Este modelo no considera barreras físicas reales, como montañas, edificaciones, vegetación densa u otras obstrucciones geográficas que puedan alterar significativamente la trayectoria de la pluma. Además, se basa en datos meteorológicos globales de baja resolución (GDAS1), los cuales no reflejan la topografía ni la dinámica atmosférica local con suficiente precisión. Por lo tanto, la dispersión estimada representa una trayectoria teórica bajo un entorno abierto y homogéneo, sin fricción del terreno ni mecanismos de deposición significativa, con viento constante y una liberación continua del contaminante.

Dado lo anterior, los resultados deben interpretarse como una aproximación orientativa que permite visualizar el comportamiento general del PM_{2.5} bajo ciertas condiciones atmosféricas, pero no como una representación exacta de la realidad. Esta limitación es fundamental al momento de evaluar los posibles impactos regionales, ya que, en la práctica, es improbable que el contaminante alcance grandes distancias en concentraciones relevantes debido a procesos naturales de disipación, sedimentación y barreras geográficas que el modelo no incorpora en esta configuración

5.4.1.1. Cuadrícula de concentración

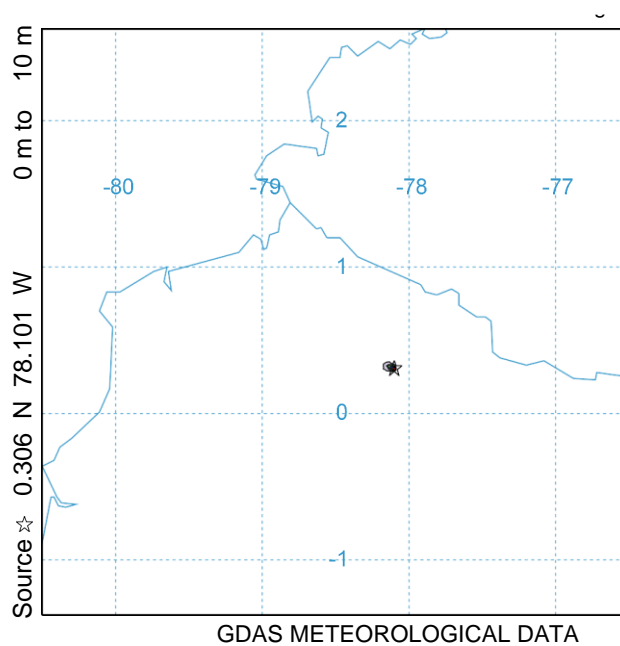
La cuadrícula de concentración generada mediante el modelo HYSPLIT permitió evaluar la evolución temporal y espacial del material particulado fino (PM_{2.5}) emitido desde la cantera San José bajo condiciones secas y con una velocidad promedio del viento de 3.61 m/s. La simulación, realizada con una emisión diaria de 518.14 kg, integró datos meteorológicos GDAS y consideró concentraciones promediadas en la capa baja de la atmósfera (0–100 m AGL) durante un periodo

de 24 horas continuas.

En la etapa inicial, las concentraciones máximas alcanzaron $6.4E-03 \text{ mg/m}^3$ ($6.4 \text{ } \mu\text{g/m}^3$), evidenciando una pluma densa en las inmediaciones de la cantera. Las tonalidades rojas y naranjas sugieren una afectación inmediata sobre San Eduardo y zonas colindantes, con dispersión limitada al entorno local

Figura 18.

Dispersión inicial de PM_{2.5} desde la cantera San José con HYSPLIT

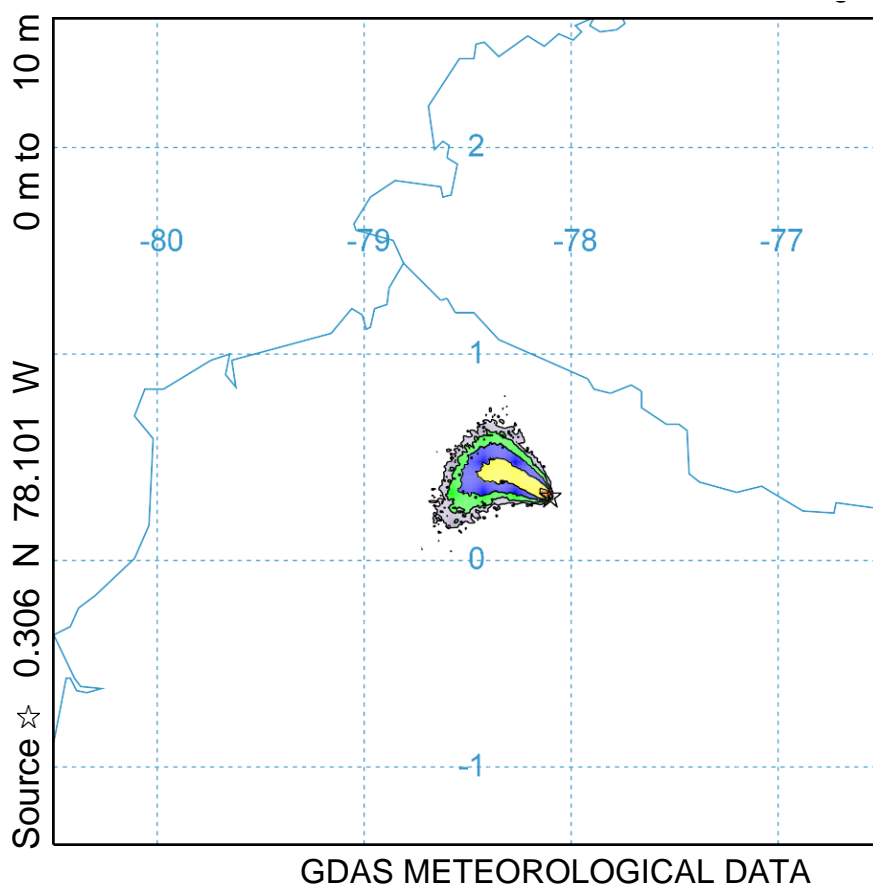


Nota. Máxima concentración de $6.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ concentrada en la cantera, afectando principalmente San Eduardo y zonas inmediatas. *Elaborado el modelo HYSPLIT (NOAA, 2025).*

En la fase intermedia, se registraron los valores más altos de la simulación, con un pico máximo de $1.7\text{E}-02 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($17 \mu\text{g}/\text{m}^3$) a las 09:00 UTC (14:00 p.m.). Este tramo refleja la expansión más intensa de la pluma hacia el noroccidente, mostrando una dispersión sostenida con presencia de niveles entre 9 y $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en áreas cercanas y medias.

Figura 19.

Dispersión media de PM_{2.5} desde la cantera San José con HYSPLIT

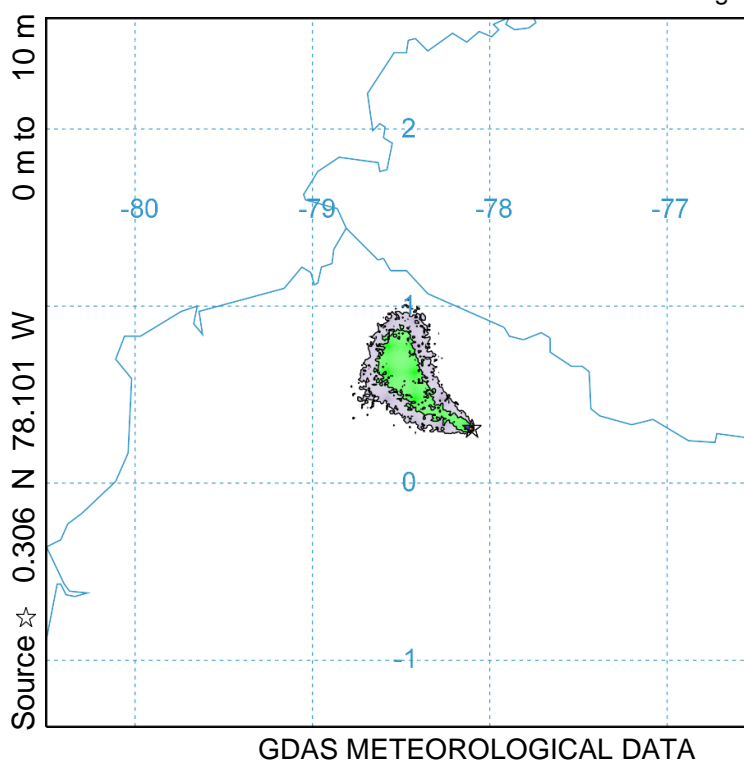


Nota. Pico máximo de 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a las 14:00, con dispersión intensa hacia el noroccidente y niveles sostenidos entre 9 y 17 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en áreas cercanas. *Elaborado el modelo HYSPLIT (NOAA, 2025).*

En la etapa final, las concentraciones disminuyeron progresivamente, hasta un mínimo de $3.0\text{E}-03 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($3 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Las tonalidades azuladas evidencian una dilución amplia del contaminante, indicando que gran parte del PM_{2.5} se ha dispersado o depositado fuera de la zona crítica.

Figura 20.

Dispersión final de PM_{2.5} desde la cantera San José con HYSPLIT



Nota. Concentración mínima de $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con amplia dispersión y dilución del contaminante fuera de la zona crítica. *Elaborado el modelo HYSPLIT (NOAA, 2025).*

Este comportamiento espacio-temporal del contaminante indica que, bajo una tasa elevada de emisión y en ausencia de lluvia, el material particulado puede alcanzar concentraciones considerables dentro del radio de influencia inmediata y extenderse gradualmente a zonas más alejadas. Esto refuerza la necesidad de implementar estrategias de mitigación en la fuente emisora, como barreras vegetales, cobertura de operaciones y sistemas de riego, para minimizar la exposición de las comunidades circundantes.

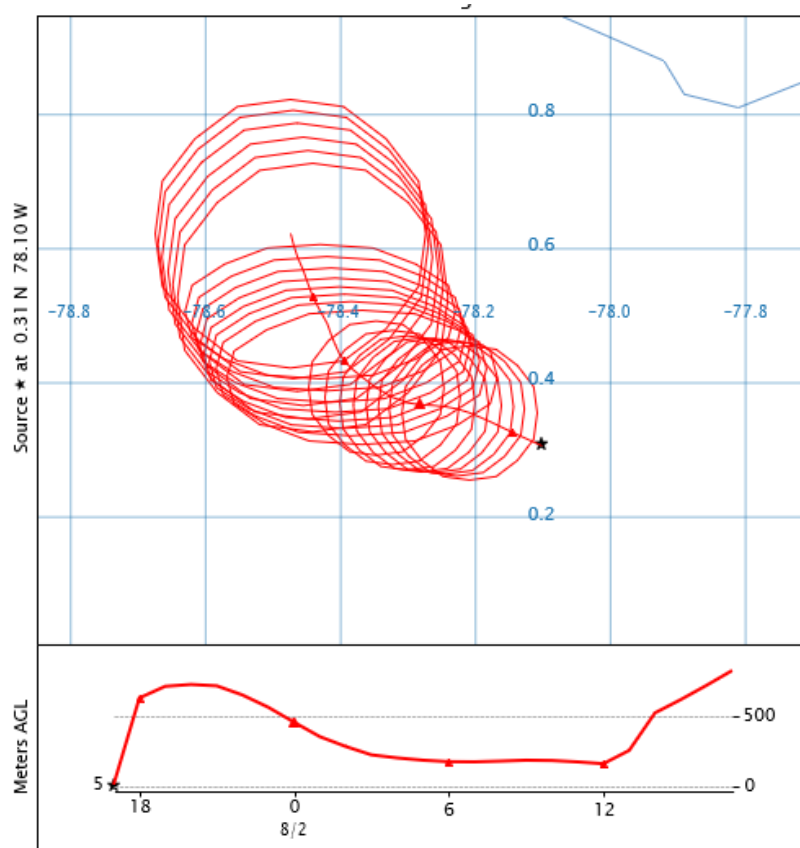
5.4.1.2. Centro de masa

El análisis de la trayectoria del centro de masa, modelada con HYSPLIT utilizando datos meteorológicos GDAS de la primera semana de agosto de 2024, permite caracterizar el desplazamiento tridimensional del contaminante PM_{2.5} emitido desde la cantera “San José”. Durante las 24 horas de simulación, se observa un movimiento dominante hacia el noroccidente,

con una dispersión que permanece en niveles bajos de la atmósfera, manteniéndose por debajo de los 500 metros sobre el nivel del suelo. Este comportamiento está influenciado por una velocidad promedio del viento de 3,61 m/s y condiciones atmosféricas secas, típicas del periodo estacional. La trayectoria indica que la pluma se extiende de forma progresiva en el plano horizontal, afectando potencialmente zonas aledañas a la fuente emisora. La simulación se realizó bajo un escenario crítico, considerando una tasa de emisión diaria de 518,14 kg, y ofrece insumos relevantes para evaluar el alcance espacial de las emisiones de $PM_{2.5}$ y proponer estrategias de mitigación local.

Figura 21.

Trayectoria del centro de masa del contaminante $PM_{2.5}$



Nota. El $PM_{2.5}$ se desplazó hacia el noroccidente, bajo 500 m de altura, con viento de 3.61 m/s y condiciones secas. *Elaborado el modelo HYSPLIT (NOAA, 2025).*

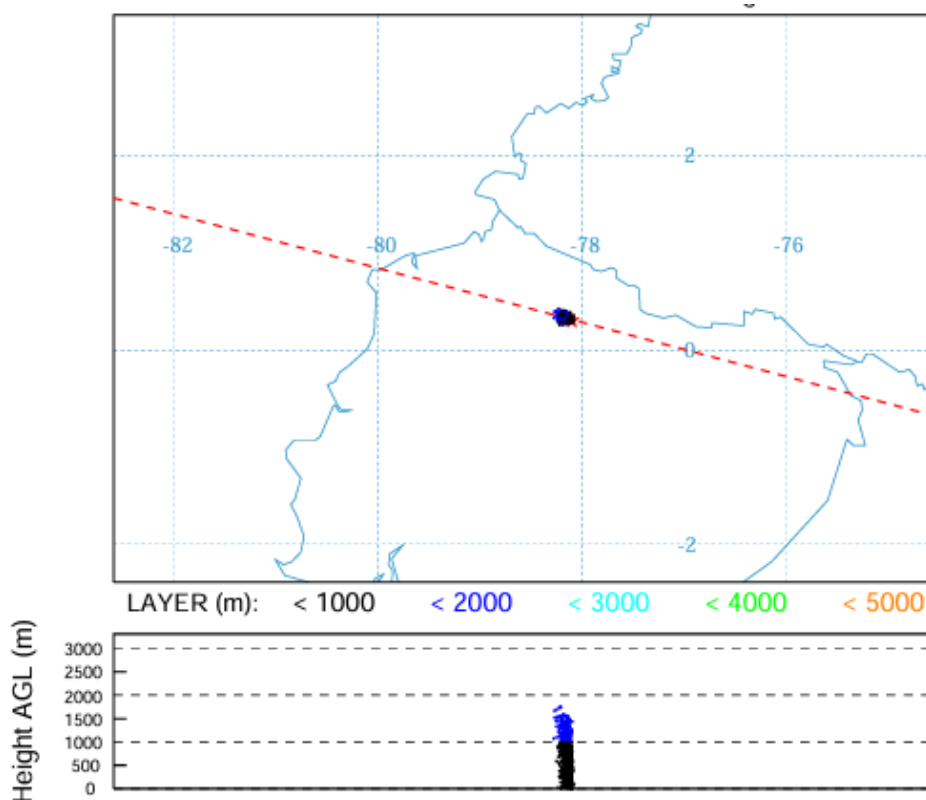
5.4.1.3. Posiciones de partícula

La simulación de Posiciones de partículas ilustra cómo el material particulado fino ($PM_{2.5}$) liberado por las actividades de la cantera “San José” se dispersa progresivamente en la atmósfera durante un período continuo de 24 horas, usando condiciones meteorológicas representativas de la estación seca, en la que se asumió una velocidad promedio del viento de 13 km/h.

Durante las primeras horas de la simulación, se observa que la mayoría de partículas se mantienen por debajo de los 1000 metros sobre el nivel del suelo (AGL), formando una pluma densa en las cercanías del punto de emisión. Este comportamiento refleja el impacto inmediato del $PM_{2.5}$ sobre las comunidades próximas, como San Eduardo, dada la baja elevación inicial de las emisiones.

Figura 22.

Análisis vertical inicial de la evolución temporal del $PM_{2.5}$



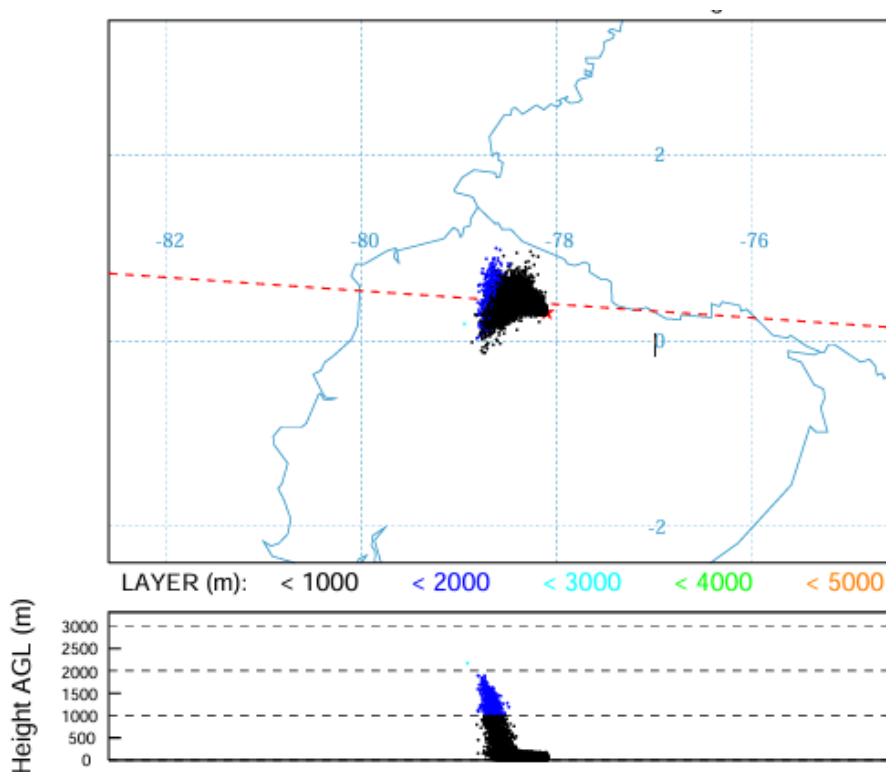
Nota. Las partículas permanecen bajo 1000 m AGL, concentrándose cerca del punto de emisión y afectando directamente a San Eduardo. *Elaborado el modelo HYSPLIT (NOAA, 2025).*

A medida que transcurre el tiempo, la pluma comienza a elevarse, alcanzando alturas de

entre 1000 y 3000 m AGL. En esta fase intermedia, se identifican núcleos de dispersión que siguen ascendiendo, empujados por corrientes convectivas y vientos predominantes, extendiendo su alcance longitudinal. La representación gráfica de la simulación muestra cómo el número de partículas se incrementa significativamente (de 980 a más de 23 000), lo cual indica una persistente suspensión y expansión atmosférica.

Figura 23.

Análisis vertical intermedio de la evolución temporal del PM_{2.5}

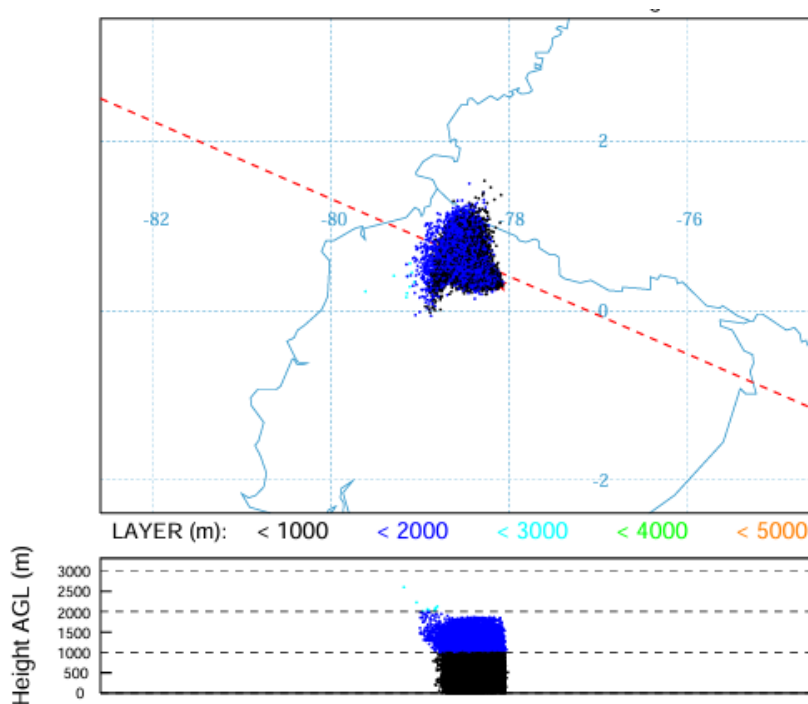


Nota. La pluma se eleva entre 1000 y 3000 m AGL, con aumento de partículas de 980 a más de 23,000, reflejando dispersión y suspensión atmosférica. *Elaborado el modelo HYSPLIT (NOAA, 2025).*

En la etapa final de la simulación, algunas trazas alcanzan cotas superiores a los 4000 m e incluso puntualmente los 5000 m AGL. Aunque la mayor concentración sigue registrándose en capas intermedias (1000–3000 m), esta dispersión vertical progresiva implica que el contaminante puede recorrer distancias mayores y, posteriormente, asentarse por deposición seca en zonas más alejadas.

Figura 24.

Análisis vertical final de la evolución temporal del PM_{2.5}

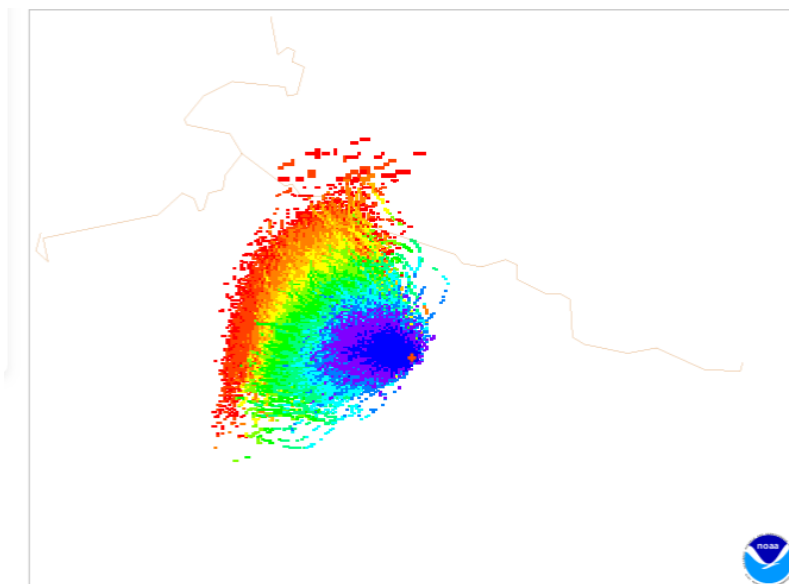


Nota. En la etapa final, algunas partículas alcanzan hasta 5000 m AGL, con concentración mayor entre 1000 y 3000 m, favoreciendo su dispersión a largas distancias. *Elaborado el modelo HYSPLIT (NOAA, 2025).*

Este comportamiento confirma que, bajo condiciones secas y sin lluvia, el material particulado no solo se mantiene en suspensión por más tiempo, sino que también puede alcanzar altitudes elevadas y desplazarse decenas de kilómetros, aumentando la probabilidad de impacto en zonas pobladas. Por tanto, este resultado justifica la necesidad de adoptar medidas de control en la fuente, como el uso de barreras vegetales, sistemas de riego por aspersión, techado de zonas de trituración y control del tránsito de maquinaria para reducir la emisión y transporte de PM_{2.5} en días críticos.

5.4.1.4. Hora de llegada

El estudio de hora de llegada de la pluma de contaminantes $PM_{2.5}$ utiliza una escala de colores progresivos para representar distintos intervalos de tiempo desde la emisión inicial: el área en rojo oscuro indica presencia de partículas en menos de 2 horas; los tonos anaranjados y amarillos abarcan de 2 a 6 horas; mientras que las zonas verdes, celestes y azuladas representan los sectores alcanzados después de 8, 10 o más horas. Esta secuencia cromática permite visualizar la expansión radial de la pluma con respecto al tiempo, proyectando su trayecto en función del viento predominante. En este caso, con una velocidad crítica de viento estimada en 3,61m/s (14km/h), se observa que la pluma podría alcanzar áreas situadas a 14 km en la primera hora, 28 km en dos horas y hasta 42 km en cuatro horas, coincidiendo con las proyecciones del modelo. Este tipo de visualización respalda técnicamente la evaluación del impacto atmosférico, ya que identifica zonas potencialmente expuestas en diferentes ventanas temporales. Además, al considerar que agosto es un mes caracterizado por la ausencia de precipitaciones lo cual impide el lavado atmosférico, se refuerza la hipótesis de que el material particulado puede recorrer distancias significativas sin interrupción. Esta información es clave en la tesis, ya que permite estimar la rapidez con la que las emisiones pueden llegar a sectores habitados, orientar la ubicación de puntos de monitoreo externos, y justificar medidas preventivas como barreras de viento, horarios restringidos de operación o sistemas de alerta temprana en áreas de influencia más distantes.

Figura 25.*Hora de llegada de la pluma de material particulado*

Nota. El contaminante $PM_{2.5}$ puede alcanzar hasta 42 km en 4 horas con vientos de 3.61 m/s, mostrando una expansión radial sin interrupción por lluvias, lo que permite estimar áreas y tiempos de exposición. *Elaborado el modelo HYSPLIT (NOAA, 2025).*

5.4.2. Dispersión de PM_{10} desde la cantera San José mediante HYSPLIT

La simulación de la dispersión del material particulado fino (PM_{10}) desde la cantera “San José”, realizada mediante el modelo HYSPLIT y documentada en el archivo de resultados, arrojó una proyección detallada de concentraciones horarias durante un período continuo de 24 horas, comprendido entre las 17:00 UTC (12:00 p.m.) del 1 de agosto y las 17:00 UTC (12:00 p.m.) del 2 de agosto de 2024. La liberación del contaminante se inició a las 17:00 UTC del 1 de agosto, bajo condiciones meteorológicas secas y con una velocidad de viento promedio de 3.61 m/s, utilizando una tasa de emisión diaria de 1592.6 kg.

5.4.2.1. Cuadrícula de concentración

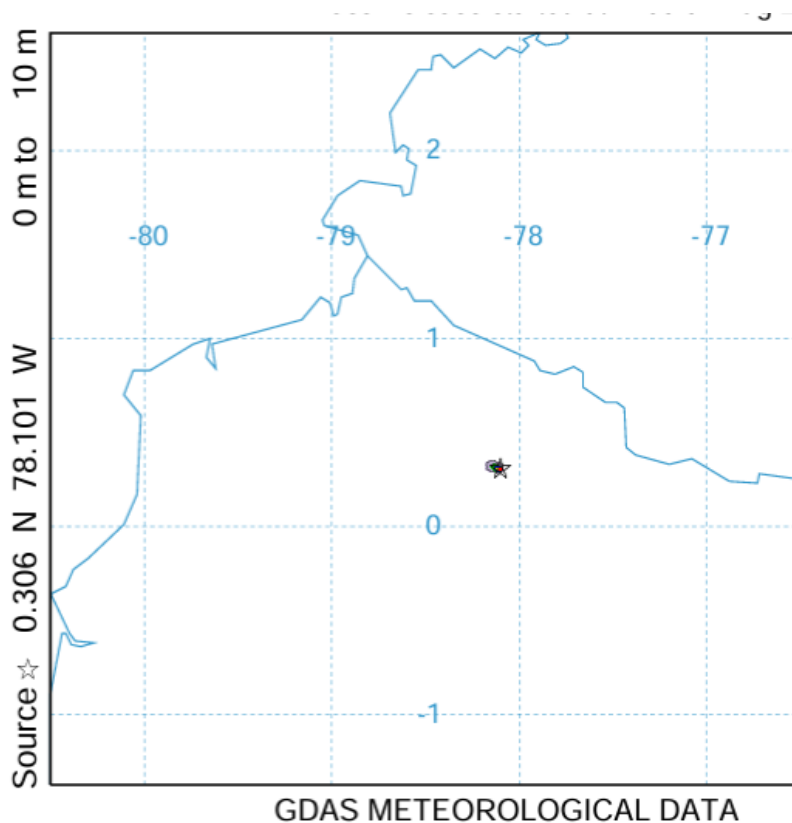
La cuadrícula de concentración generada mediante el modelo HYSPLIT permite visualizar la evolución temporal y espacial del material particulado fino (PM_{10}) desde la cantera “San José”, considerando una emisión crítica de 1592.6 kg por día, bajo condiciones meteorológicas secas y

una velocidad promedio del viento de 3.61 m/s, con datos promediados en la capa inferior de la atmósfera (0–100 m AGL).

En la etapa inicial, se observaron concentraciones elevadas en las inmediaciones de la fuente, alcanzando un máximo de $2.0\text{E-}02 \text{ mg/m}^3$ ($20 \text{ }\mu\text{g/m}^3$), representado por tonalidades rojas intensas, lo que indica una pluma concentrada y confinada sobre el área de emisión.

Figura 26.

Dispersión inicial de PM_{10} desde la cantera San José con HYSPLIT

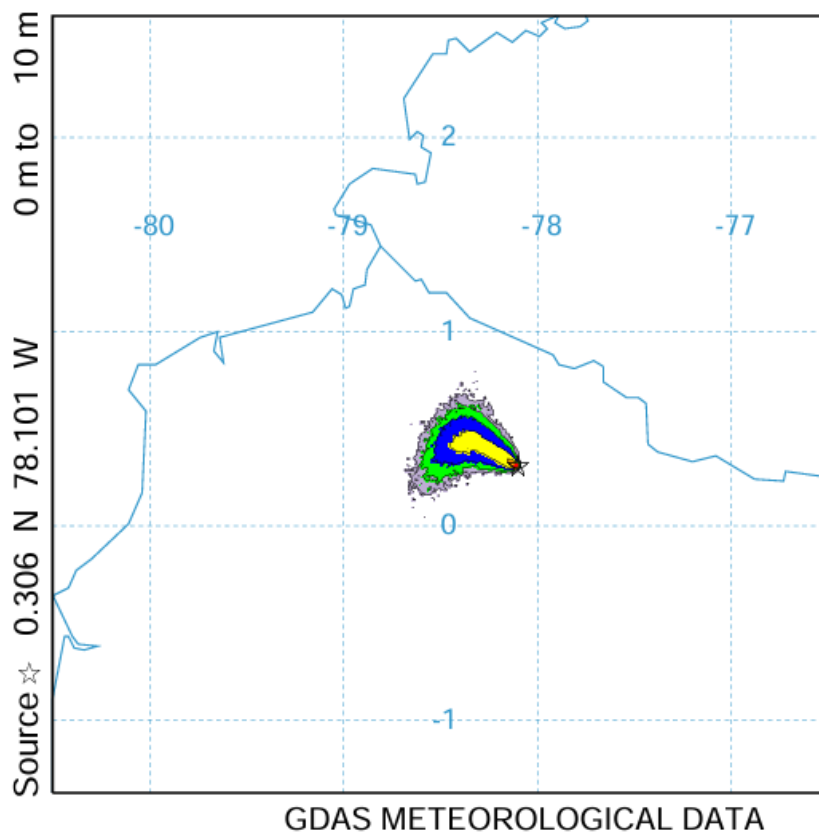


Nota. Concentración máxima de $20 \text{ }\mu\text{g/m}^3$ cerca de la fuente, con dispersión confinada y tonos rojos que indican alta intensidad en el área de emisión.

Durante la fase intermedia, se registraron los niveles más altos de toda la simulación, con picos de concentración de hasta $4.5\text{E-}02 \text{ mg/m}^3$ ($45 \text{ }\mu\text{g/m}^3$). Esta etapa refleja una dispersión más amplia, con expansión horizontal hacia el noroccidente y persistencia de núcleos críticos ($>0.03 \text{ mg/m}^3$) en las proximidades de la cantera.

Figura 27.

Dispersión media de PM₁₀ desde la cantera San José con HYSPLIT

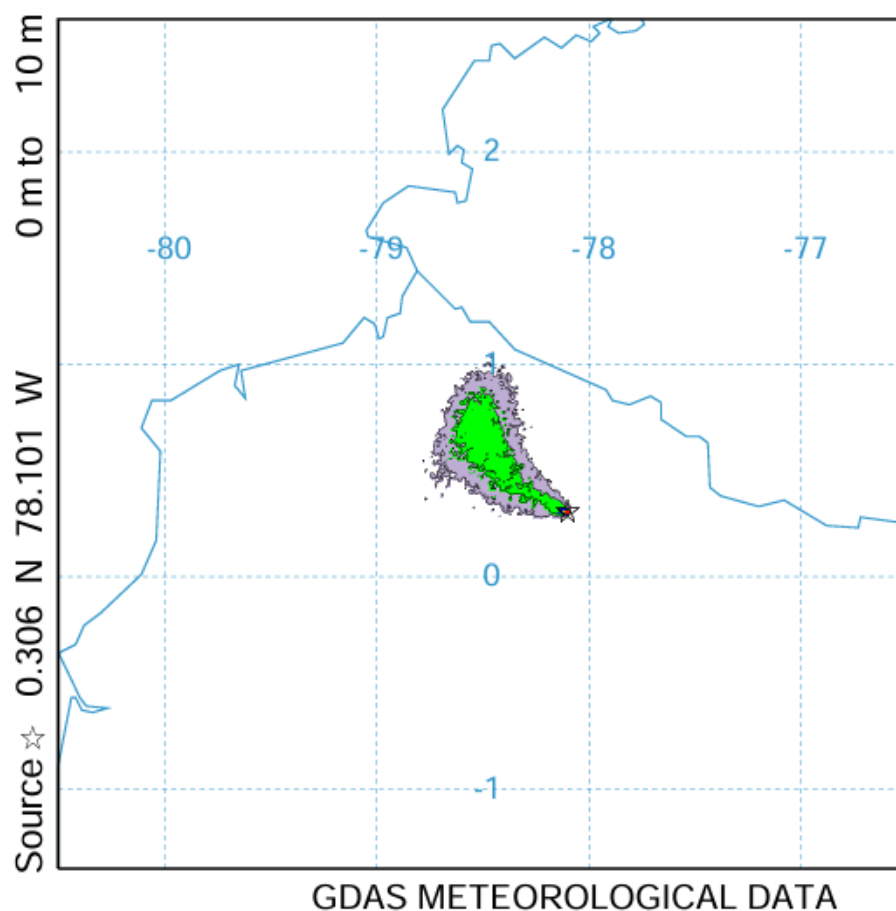


Nota. Se alcanzó una concentración máxima de $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con dispersión amplia hacia el noroccidente y persistencia de núcleos críticos cerca de la cantera.

Finalmente, en la etapa final, las concentraciones disminuyeron progresivamente, alcanzando valores mínimos de $9.1\text{E}-03 \text{ mg}/\text{m}^3$ ($9.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), con una pluma diluida que cubre una mayor superficie. Las tonalidades azules claras en la imagen indican un estado avanzado de dispersión, con baja concentración en áreas más distantes.

Figura 28.

Dispersión final de PM₁₀ desde la cantera San José con HYSPLIT



Nota. Concentraciones mínimas de $9.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y dispersión avanzada, con baja presencia de contaminante en zonas más alejadas.

Esta evolución espacio-temporal del contaminante demuestra que, bajo un escenario de emisión crítica y condiciones secas típicas de agosto, el PM₁₀ puede alcanzar concentraciones significativas en la atmósfera superficial, lo que justifica la implementación de estrategias de mitigación para reducir su impacto en las zonas pobladas cercanas.

5.4.2.2. Centro de masa

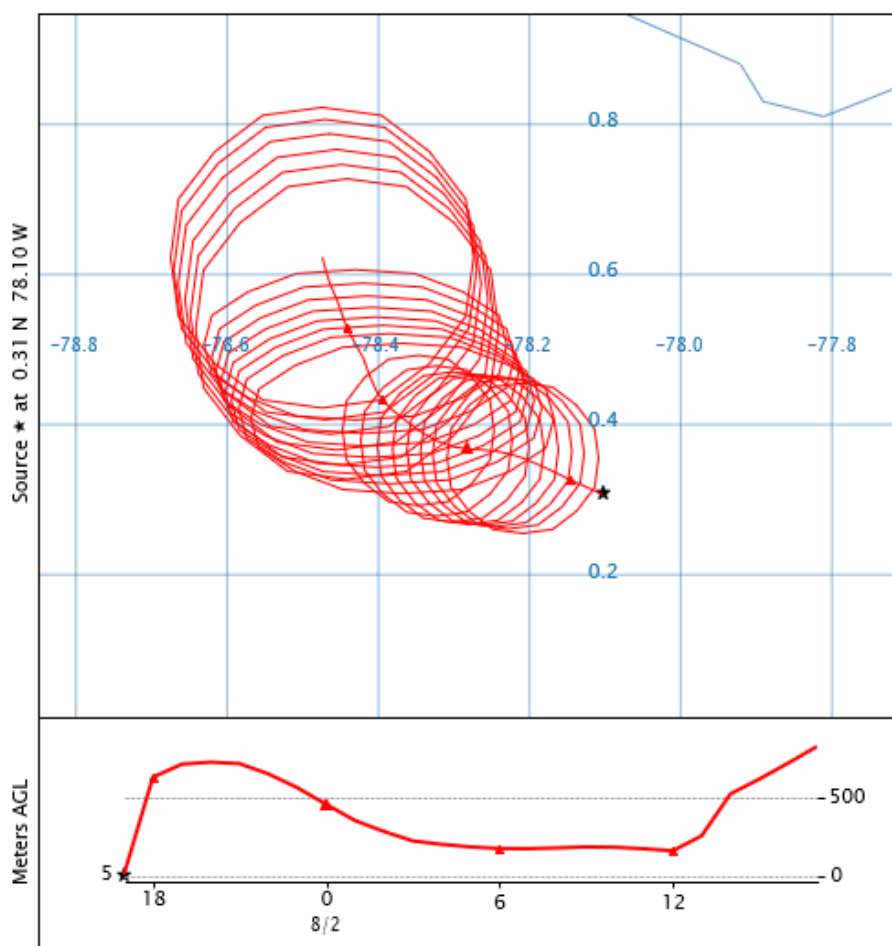
El análisis de la trayectoria del centro de masa, modelada con HYSPLIT utilizando datos meteorológicos GDAS correspondientes al 1 de agosto de 2024, permite caracterizar el

desplazamiento tridimensional de una emisión atmosférica simulada desde la cantera “San José”. Durante las 24 horas de simulación, se evidencia un movimiento predominante hacia el sureste, con una dispersión que inicialmente asciende por encima de los 500 metros sobre el nivel del suelo y posteriormente desciende, manteniéndose la mayor parte del tiempo a niveles bajos, por debajo de los 200 metros AGL. Este comportamiento sugiere una limitada dispersión vertical y un mayor impacto a escala local.

La trayectoria muestra una expansión progresiva en el plano horizontal, lo que podría afectar áreas cercanas al punto de emisión. Las condiciones atmosféricas durante el evento presentan estabilidad moderada, lo que favorece trayectorias relativamente concentradas. La simulación se ejecutó considerando una liberación de 1592,6 kg de contaminante desde una altura inicial de 0 a 10 metros, durante un periodo de 24 horas a partir de las 17:00 UTC del 1 de agosto. Los resultados constituyen una herramienta clave para comprender el comportamiento del penacho de emisión y para sustentar la planificación de medidas de control ambiental en la zona de influencia directa.

Figura 29.

Trayectoria del centro de masa del contaminante PM_{10} -Modelo HYSPLIT



Nota. Simulación de trayectorias del contaminante desde la cantera “San José”, realizada con el modelo HYSPLIT el 1 de agosto de 2024. Se observa un desplazamiento hacia el sureste, con alturas mayormente inferiores a 200 m sobre el suelo. *Elaborado el modelo HYSPLIT (NOAA, 2025).*

5.4.2.3. Posiciones de partícula

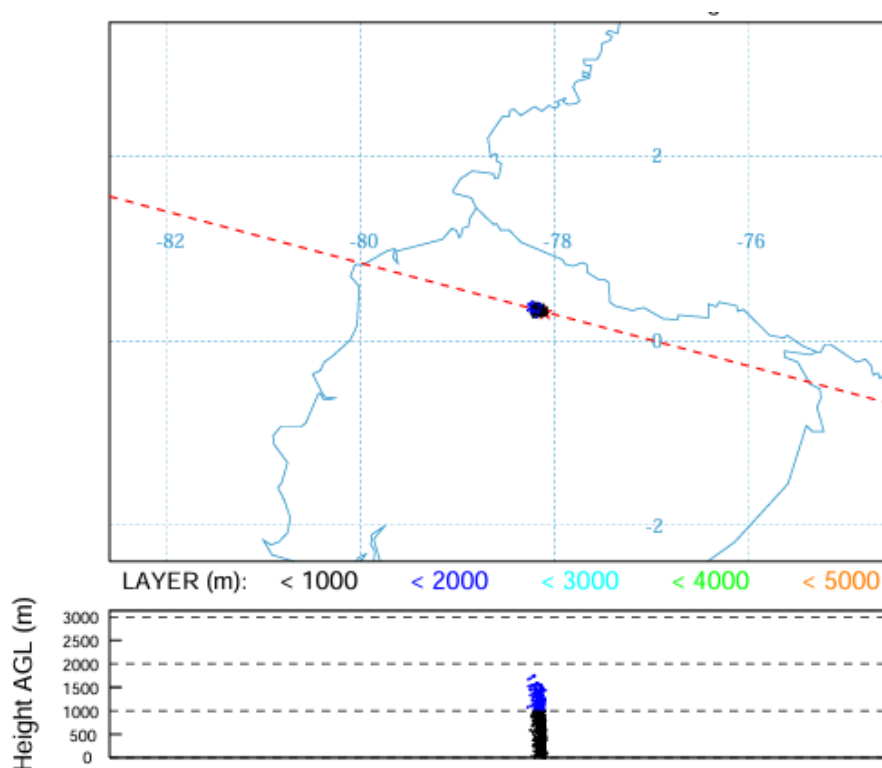
La simulación de posiciones de partículas, elaborada mediante el modelo HYSPLIT con datos meteorológicos GDAS del 1 de agosto de 2024, representa el comportamiento tridimensional del material particulado grueso (PM_{10}) emitido desde la cantera “San José”. Se modeló la dispersión de 1592,6 kg de contaminante durante un periodo continuo de 24 horas, considerando

una altura inicial de liberación de 0 a 10 metros sobre el nivel del suelo, una velocidad promedio del viento de 13 km/h y condiciones secas sin mecanismos de remoción atmosférica.

En las primeras horas, las partículas se mantienen por debajo de los 1000 metros AGL, formando una pluma densa en el entorno inmediato. En esta fase inicial se registran entre 980 y 3906 partículas visibles, lo que refleja un impacto localizado sobre áreas cercanas como San Eduardo.

Figura 30.

Análisis vertical inicial de la evolución temporal del PM₁₀

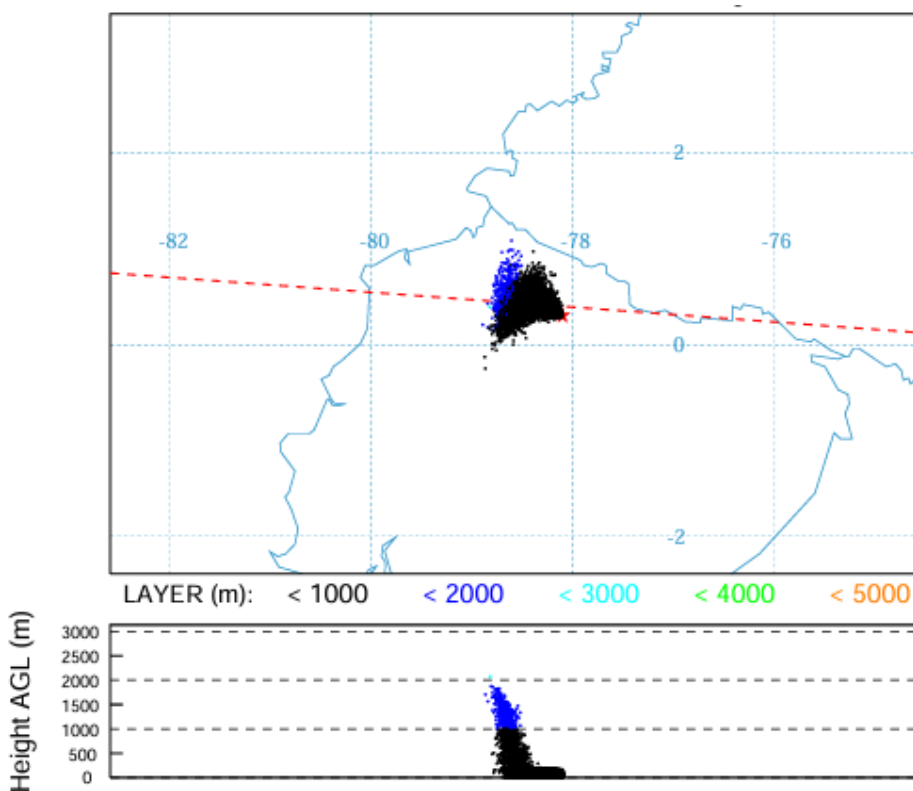


Nota. En la fase inicial, las partículas se mantuvieron bajo 1000 m AGL, con hasta 3906 registradas, indicando impacto localizado en San Eduardo. *Elaborado el modelo HYSPLIT (NOAA, 2025).*

Conforme avanza la simulación, la pluma asciende progresivamente hasta los 3000 metros AGL y se extiende horizontalmente, incrementando el número de partículas a más de 9755 para las 03:00 UTC (8:00 a.m.) del 2 de agosto.

Figura 31.

Análisis vertical inicial de la evolución temporal del PM₁₀

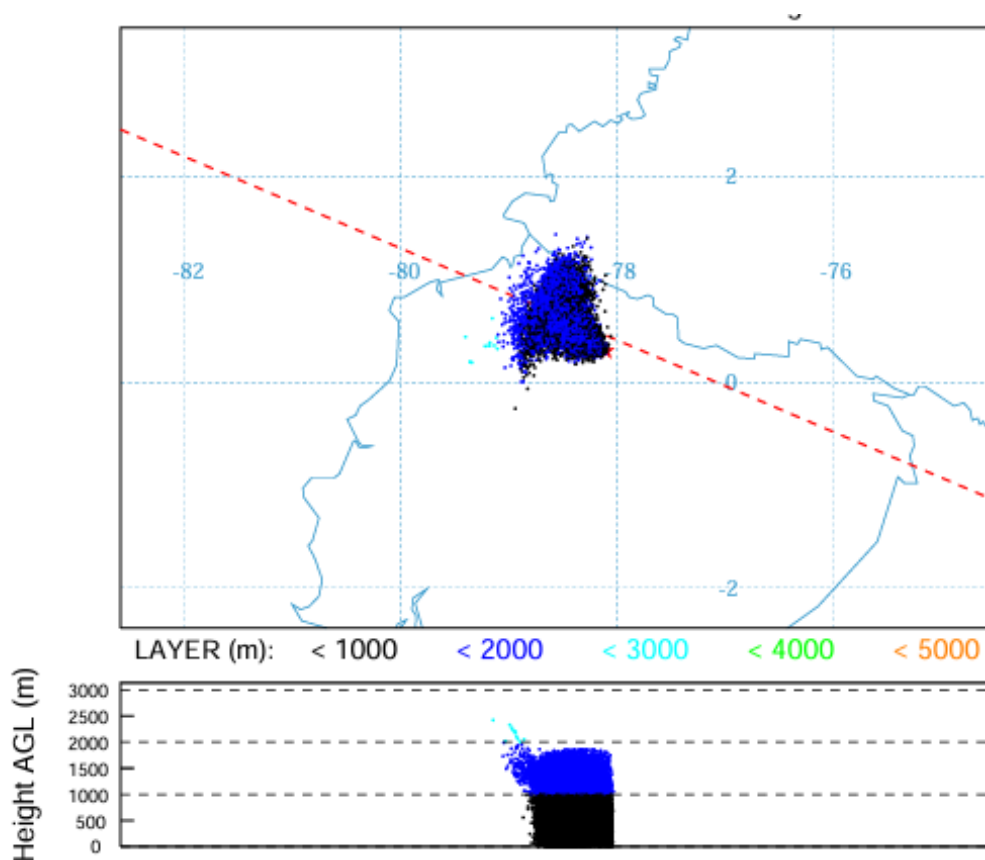


Nota. A las 03:00 UTC del 2 de agosto, la emisión superó los 9755 registros y alcanzó hasta 3000 m AGL, con expansión horizontal sostenida. *Elaborado el modelo HYSPLIT (NOAA, 2025).*

Finalmente, hacia el cierre del modelo (17:00 UTC (12:00 p.m.) del 2 de agosto), se observa una dispersión máxima con 23.385 partículas distribuidas, algunas alcanzando altitudes de entre 4000 y 5000 metros AGL, lo que evidencia el potencial de transporte a larga distancia.

Figura 32.

Análisis vertical inicial de la evolución temporal del PM₁₀



Nota. A las 17:00 UTC del 2 de agosto se registraron 23,385 partículas, con alturas de hasta 5000 m AGL, indicando potencial de transporte a larga distancia. *Elaborado el modelo HYSPLIT (NOAA, 2025).*

Estos resultados confirman que, bajo condiciones secas, el PM₁₀ puede permanecer en suspensión durante varias horas, alcanzar grandes alturas y desplazarse decenas de kilómetros, aumentando el área de afectación. Por tanto, se recomienda implementar medidas de mitigación directa en la fuente, como sistemas de riego por aspersión, vegetación como barreras rompeviento, techado de zonas críticas y regulación del tránsito de maquinaria pesada.

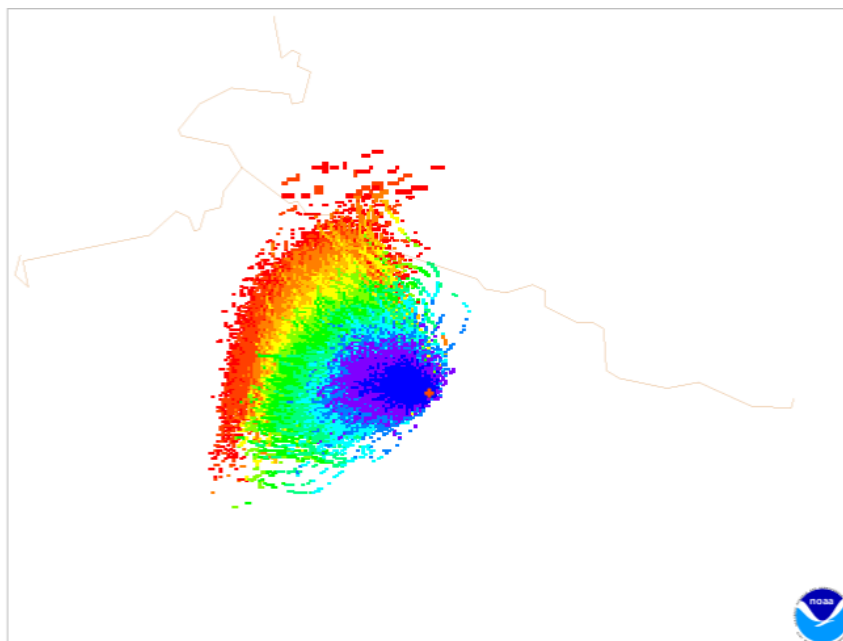
5.4.2.4. Hora de llegada

El análisis de la hora de llegada de la pluma de contaminantes, modelada con HYSPLIT para el 1 de agosto de 2024 con una altitud de 100 metros, emplea una escala cromática que permite visualizar la progresión temporal del desplazamiento del material particulado. La imagen presenta

un gradiente de colores desde el azul intenso hasta el rojo oscuro, donde las zonas azules representan áreas alcanzadas por la pluma en menos de 2 horas; los tonos verdes y amarillos indican tiempos de llegada entre 4 y 12 horas; y los colores naranjas y rojos señalan sectores impactados entre 14 y más de 22 horas tras la emisión inicial. Esta distribución evidencia un patrón de dispersión predominante hacia el sureste, lo que sugiere la influencia de vientos regionales que favorecen dicho desplazamiento.

Con una velocidad de viento constante de aproximadamente 14 km/h (3.61 m/s), se estima que la pluma pudo haber alcanzado distancias cercanas a los 14 km en la primera hora, 28 km en dos horas y hasta 42 km en las primeras tres horas, coincidiendo con las zonas de mayor concentración (color azul y verde). Este comportamiento es coherente con condiciones típicas de agosto, un mes caracterizado por la ausencia de precipitaciones, lo que reduce significativamente la posibilidad de lavado atmosférico y permite que el material particulado recorra grandes distancias sin ser removido del aire.

Este tipo de visualización aporta evidencia técnica clave para la evaluación del impacto atmosférico, permitiendo identificar áreas potencialmente afectadas en diferentes ventanas temporales. Además, orienta decisiones estratégicas como la ubicación de puntos de monitoreo, el diseño de barreras rompeviento o la implementación de alertas tempranas en sectores ubicados dentro del radio de influencia de la pluma.

Figura 33.*Hora de llegada de la pluma de material particulado*

Nota. La simulación muestra un desplazamiento hacia el sureste con tiempos de llegada entre 2 y 22 horas, alcanzando hasta 42 km con vientos de 14 km/h, sin remoción por lluvia. *Elaborado el modelo HYSPLIT (NOAA, 2025).*

5.5. Plan de manejo ambiental para la cantera “San José”

5.5.1. Introducción

La Cantera San José, ubicada en el sector San Eduardo, cantón Ibarra, provincia de Imbabura, Ecuador, se dedica a la extracción de áridos y materiales pétreos mediante explotación a cielo abierto. Esta actividad genera emisiones de material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) que afectan la calidad del aire local y la salud de las comunidades cercanas.

El presente Plan de Manejo Ambiental tiene como objetivos principales: minimizar los impactos ambientales de la operación minera, proteger la salud de la población circundante y asegurar el cumplimiento de la normativa ecuatoriana vigente (Acuerdo Ministerial 097-A, (MAATE, 2024)). El plan se fundamenta en el diagnóstico de calidad del aire realizado en mayo de 2025, que reportó concentraciones promedio de 19,6 µg/m³ de PM_{2.5} y 60,2 µg/m³ de PM₁₀, con proyecciones de incremento en temporada seca hasta 33,3 µg/m³ de PM_{2.5} y 102,3 µg/m³ de PM₁₀.

El PMA propone un conjunto de medidas integrales para prevenir, mitigar y monitorear impactos ambientales, promoviendo una operación minera sostenible y socialmente responsable.

5.5.2. Línea Base Ambiental

Ubicación y extensión: La concesión minera San José (código 100104013) ocupa 5 hectáreas en San Eduardo, Ibarra, a una altitud aproximada de 2.495 msnm (Flores, 2019).

Geología y suelos: Predominan depósitos volcánicos del Plioceno-Cuaternario (andesitas, brechas, tobas) sobre un basamento de rocas básicas y ultrabásicas. Los suelos son Andisoles: Humic Udivitrands (francos arenosos, pH \approx 6.3, alto contenido de materia orgánica), Pachic Hapludolls y Typic Hapludolls (francos a arcillosos, pH 5.8–6.3) bien drenados (Vallejo, 2007).

Clima: La zona presenta estación lluviosa de noviembre a mayo y seca en julio-agosto. Los vientos dominantes son del Sureste hacia el Noroeste, con velocidades de 2–5 m/s en la mañana y 3–5 m/s por la tarde, favoreciendo la sedimentación de PM en horarios matutinos y su redistribución vespertina.

Calidad del aire: Durante mayo de 2025, las concentraciones promedio fueron de 19,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{2.5} y 60,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM₁₀, cumpliendo con los límites diarios de 50 y 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ establecidos por la normativa ecuatoriana. Sin embargo, simulaciones para temporada seca proyectan concentraciones de hasta 33,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{2.5} y 102,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM₁₀, superando el límite legal para PM₁₀ y evidenciando la necesidad de medidas de control.

Entorno social: La comunidad de San Eduardo y Santa Rosa del Tejar podría verse afectada por el polvo generado, especialmente en temporada seca, lo que requiere atención en relaciones comunitarias y mitigación de impactos.

5.5.3. Identificación y Evaluación de Impactos Ambientales

Impacto	Descripción	Magnitud	Alcance	Reversibilidad
Emisión de Material particulado	Liberación de material particulado durante extracción, trituración, transporte y almacenamiento.	Moderada (temporada húmeda), alta (temporada seca)	Local, con dispersión potencial hasta 42 km en condiciones secas (NOAA, 2025)	Alta con medidas de mitigación (riego, barreras, coberturas)
Salud humana	Irritación respiratoria, alergias, riesgos cardiovasculares por exposición a PM2.5 y PM10 (OMS, 2024; EPA, 2025).	Moderada-alta	Población cercana	Alta con EPP y control de polvo
Erosión y pérdida de suelo	Remoción de vegetación y taludes expuestos favorecen escorrentía y sedimentación.	Moderada	Plataformas y alrededores	Alta con revegetación y estabilización de taludes
Contaminación hídrica	Arrastre de sedimentos el río Tahuando.	Baja-moderada	Quebradas y cursos aguas abajo	Alta con manejo de residuos y drenajes
Riesgos ocupacionales	Accidentes por taludes, falta de EPP y servicios básicos.	Alta	Trabajadores	Alta con implementación de EPP y capacitación
Impacto visual	Alteración del paisaje y morfología original.	Moderada	Área de extracción	Alta con rehabilitación progresiva
Relaciones comunitarias	Quejas por polvo	Moderada	Comunidad San Eduardo-Santa Rosa del Tejar	Alta con programas de educación y diálogo

5.5.4 Programas del Plan de Manejo Ambiental

5.5.4.1. Programa de Prevención y Mitigación

Reducir emisiones de PM2.5 y PM10 y prevenir erosión de suelos.

Medidas:

- Nebulización de agua en zonas de extracción y almacenamiento (3 veces/día en temporada seca, con aditivos para mayor adhesión de polvo).
- Riego de vías internas no pavimentadas mediante tanque remolque (2 veces/día, ajustable según tráfico y clima).
- Cobertura de cargas con lonas en transporte de áridos.
- Instalación de barreras vegetales con especies nativas (*Alnus acuminata*) en perímetros críticos.
- Señalización y colocación de barreras físicas en áreas de riesgo.

5.5.4.2. Programa de Manejo de Desechos

Minimizar riesgos de contaminación del suelo y agua por residuos.

Medidas:

- Separación de residuos en la fuente: azul (reciclables), verde (orgánicos), negro (generales) y rojo (peligrosos).
- Recolección y disposición de aceites usados, filtros y baterías mediante gestor autorizado.
- Plan de contingencia ante derrames de combustibles con materiales absorbentes y capacitación del personal.

5.5.4.3. Programa de Rehabilitación y Cierre de Cantera

Restaurar áreas intervenidas y garantizar estabilidad post-explotación.

Medidas:

- Nivelación de terrenos y rediseño de pendientes (<math><40^\circ</math>).
- Reforestación progresiva: herbáceas pioneras (kikuyo, bledo), arbustos (chilca, matico) y árboles endémicos (aliso, *Cedrela odorata*).
- Retiro de infraestructura y limpieza de áreas de acopio de combustible y residuos.
- Instalación de drenajes y zanjas de infiltración para control de erosión.
- Monitoreo post-cierre durante 2 años: supervivencia vegetal, estabilidad de

taludes y restauración de suelos.

5.5.4.4 Programa de Educación y Capacitación Ambiental

Sensibilizar a trabajadores y comunidad sobre impactos y mitigación.

Medidas:

- Charlas comunitarias sobre calidad del aire, seguridad y gestión ambiental.
- Difusión de resultados de monitoreo en medios locales y participación en actividades de reforestación comunitaria.

5.5.4.5. Programa de Seguridad y Salud Ocupacional

Proteger la salud de los trabajadores expuestos a PM y riesgos laborales.

Medidas:

- Provisión de EPP (casco, gafas, chaleco, botas y mascarillas N95).
- Señalización de seguridad y rutas de evacuación.
- Botiquín, extintores y servicios básicos adecuados.
- Capacitaciones diarias en seguridad y procedimientos de emergencia.
- Exámenes médicos anuales enfocados en salud respiratoria.

5.5.4.6. Programa de Relaciones Comunitarias

Construir confianza y comunicación transparente con la comunidad de San Eduardo.

Medidas:

- Creación de comité de diálogo cantera-comunidad-autoridades.
- Información trimestral sobre resultados de monitoreo y medidas implementadas.
- Apoyo a proyectos comunitarios (mejoras en caminos, campañas de salud o educación).

5.5.4.7 Programa de Monitoreo y Seguimiento Ambiental

Verificar cumplimiento de normativa y efectividad de medidas.

Medidas:

- Monitoreo de PM2.5 y PM10 en temporadas secas y de lluvia.
- Registro de variables meteorológicas (viento, precipitación, temperatura) mediante Meteoblue u otras fuentes confiables.
- Evaluación de eficacia de nebulización, riego y barreras vegetales (reducción

esperada de PM 30–50%).

- Elaboración de informes semestrales para autoridades competentes (MAATE, GAD Ibarra).

5.5.5. Cronograma de Ejecución (Meses 2025–2026)

Programa	Actividad	Meses	Responsable
Prevención y Mitigación	Instalación de nebulización	Agosto–septiembre 2025	Operador de cantera
Prevención y Mitigación	Riego de vías	Mensual en épocas secas	Personal de mantenimiento
Prevención y Mitigación	Plantación de barreras vegetales	Octubre–diciembre 2025	Equipo ambiental
Manejo de Desechos	Disposición de residuos	Mensual	Contratista autorizado
Rehabilitación	Reforestación inicial	Enero–marzo 2026	Consultora ambiental
Educación	Talleres a trabajadores	Trimestral	Capacitador externo
Seguridad	Entrega de EPP	Mensual	Gerente de seguridad
Monitoreo	Mediciones PM	Semanal	Técnico ambiental

5.5.6. Presupuesto Estimado (USD)

Programa	Actividad	Costo Estimado
Prevención y Mitigación	Nebulización	5,000
Prevención y Mitigación	Riego de vías	2,000/año
Prevención y Mitigación	Barreras vegetales	3,000
Manejo de Desechos	Disposición de residuos	1,500/año
Rehabilitación	Reforestación	4,000
Relaciones Comunitarias	Proyectos	2,000/año
Monitoreo	Equipos y análisis	3,000/año
Total, anual aproximado		20,500

5.5.7. Conclusión

Este PMA asegura la reducción de emisiones de PM2.5 y PM10 en la Cantera San José,

cumpliendo con la normativa ecuatoriana y protegiendo la salud de las comunidades cercanas. La combinación de medidas técnicas (nebulización, riego, barreras), sociales (educación, diálogo) y de monitoreo continuo garantiza una gestión ambiental sostenible. La implementación requiere coordinación con autoridades (MAATE) y la comunidad para maximizar su eficacia.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

El análisis de calidad del aire realizado en la cantera “San José” evidenció que las concentraciones de material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10} durante mayo de 2025 se mantuvieron dentro de los límites establecidos por la normativa ambiental ecuatoriana, reflejando una afectación localizada y controlada en el entorno inmediato de la explotación. Las zonas operativas internas, especialmente el área de extracción, presentaron las concentraciones más altas debido al tránsito de maquinaria y manipulación directa del material, mientras que, en el punto externo, ubicado a 100 metros, las concentraciones disminuyeron significativamente, lo que indica una dispersión limitada influenciada por la topografía cerrada y las precipitaciones frecuentes durante el periodo evaluado.

Se confirmó una correlación positiva moderada entre las fracciones $PM_{2.5}$ y PM_{10} , lo cual respalda la existencia de una fuente común de emisión y destaca el papel modulador del clima sobre la concentración de contaminantes. Estas condiciones, junto con la naturaleza geológica del terreno compuesto por rocas volcánicas fácilmente desintegrables y la morfología del sitio, favorecen la generación y acumulación de partículas en suspensión.

En función de esta caracterización, se establecen criterios técnicos fundamentales para la formulación de un plan de manejo ambiental orientado a reducir las emisiones en los sectores críticos. Las estrategias recomendadas incluyen el riego controlado de vías internas, la instalación de barreras vegetales y la optimización del transporte de áridos, además del fortalecimiento del monitoreo durante la temporada seca. Estos hallazgos permiten fundamentar acciones correctivas y preventivas que garantizan una gestión ambiental eficiente, basada en datos objetivos y ajustada a las condiciones particulares del entorno intervenido, cumpliendo así con los objetivos planteados en este estudio.

CAPÍTULO VII

RECOMENDACIONES

Aunque los resultados obtenidos indican que la calidad del aire en la cantera “San José” cumple con los límites establecidos por la normativa ambiental vigente, se recomienda fortalecer el monitoreo, especialmente durante la temporada seca (verano), cuando la falta de precipitaciones favorece el aumento significativo de las concentraciones de material particulado, incrementando el riesgo para la salud humana y ambiental.

Para mitigar esta situación, se propone implementar un sistema de nebulización de agua en las zonas de extracción, almacenamiento y carga, así como mantener y optimizar el riego de las vías de acceso mediante tanques remolques, conforme a las regulaciones vigentes. Además, es necesario garantizar la cobertura obligatoria de las cargas en las volquetas para evitar la dispersión de partículas durante el transporte.

Además, se sugiere promover la mejora estructural de las vías de acceso mediante técnicas como el asfaltado en frío, en coordinación con la comunidad y autoridades locales, con el fin de asegurar una reducción sostenida de la generación de polvo. Por último, se recomienda llevar a cabo estudios complementarios que permitan evaluar el impacto de las partículas en la salud de la población cercana y la eficacia de las medidas de mitigación implementadas, asegurando así una gestión ambiental integral y sostenible a largo plazo.

CAPÍTULO VIII

BIBLIOGRAFÍA

- Abadi, A. R. S., Hamzeh, N. H., Kaskaoutis, D. G., Vuillaume, J. F., Shukurov, K. A., & Gharibzadeh, M. (2025). Spatio-Temporal Distribution of PM_{2.5} and PM₁₀ Concentrations and Assessment of Public Health Risk in the Three Most Polluted Provinces of Iran. *Sustainability (Switzerland)*, 17(1). <https://doi.org/10.3390/su17010044>
- Acosta, M., Rodríguez, L., Cuitiva, A., Altamar, A., & Aragón, J. (2019). *Comparación de la calidad de aire por pm₁₀ y pm 2.5 con la temperatura y precipitaciones en una zona aledaña a la universidad libre sede bosque en bogotá d.c.* <https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/download/247/243/474>
- Aguilar, P. (2024). Evaluación de los Impactos Ambientales en la Cantera Taparachi Generadas por la Explotación de Materiales Empleados en la Construcción. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(2), 1307–1326. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i2.10568
- Alvarado, J., & Cedeño, V. (2024). *Evaluación de la contaminación por emisiones de material particulado proveniente de una cantera en la urbanización bosques de la costa aplicando un modelo de dispersión.* 103. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5374/1/UPS-GT000502.pdf>
- Alvis, E. (2012). *Impacto ambiental generado por el material particulado, sobre la calidad del aire en la zona de influencia de los proyectos carbonífero del departamento del cesar.* chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcglclefindmkaj/<https://apidspace.javeriana.edu.co/server/api/core/bitstreams/c3f8e689-23a5-41eb-8a61-b454768df3b2/content>
- Angulo, R. (2008). *Medición y Evaluación de la calidad del aire en los sectores de Fertisa y Trinitaria de la ciudad de Guayaquil debido a la presencia de material particulado menor a 10 y 2.5 um.* chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcglclefindmkaj/<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/10669/1/D-39725.pdf>
- Aránguez, E., Ordóñez, M., Serrano, J., Aragonés, N., Fernández, R., Gandarillas, A., & Galán, I. (1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. In *Rev Esp Salud Pública* (Vol. 73). chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://scielo.isciii.es/pdf/resp/v73n2/contam_atmos.pdf

Arciniégas, C. (2012). *Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable pm 10 **.

http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-24742012000100012

Arregui, B. (2014). *Sistema de generación eléctrica adelca modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos*.

https://ewdata.rightsindevelopment.org/files/documents/44/IADB-EC-L1144_hn6IVlw.pdf

Avellaneda, F. (2012). *Apoyo al seguimiento ambiental de las licencias ambientales donde están involucrados equipos como trituración, transporte, banda transportadora, mezcladora en la corporación autónoma regional del Cesar (corpocesar) en la ciudad de Valledupar-Cesar*.

<https://repositorioinstitucional.ufpso.edu.co/xmlui/handle/20.500.14167/1024>

Awos, A., Thompson, S., Adedeji, O., Zvomuya, F., & Zhang, Q. (2024). Monitoring of Air Quality for Particulate Matter (PM_{2.5}, PM₁₀) and Heavy Metals Proximate to a Cement Factory in Ewekoro, Nigeria. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 12(10), 152–180. <https://doi.org/10.4236/gep.2024.1210009>

Ballester, F. (2005). *ontaminación atmosférica, cambio climático y salud*. chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://scielo.isciii.es/pdf/resp/v79n2/colaboracion3.pdf

Bario, O. (2017). *Contaminación del ambiente por material particulado generado en las obras civiles*. 1–98. file:///C:/Users/moral/Downloads/T628.53%20B275.pdf

Barraza, C., & Sánchez, L. (2019). *Evaluación de la concentración de material particulado pm10 en la región norte – centro histórico de la ciudad de barranquilla*.

<https://repositorio.cuc.edu.co/bitstreams/516d39a6-7588-43a6-af36-6dfaa91af34f/download>

Barry, M., & Maesano, I. (2017). Ten principles for climate, environment and respiratory health. In *European Respiratory Journal* (Vol. 50, Issue 6). European Respiratory Society.

<https://doi.org/10.1183/13993003.01912-2017>

Bermudes, C. (2004). *Gestión de la calidad del aire: Causas, Efectos y Soluciones Diseño de Carátula*. chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/libros/mambiente/gest_cal/pdf/t_completo.pdf

- Bravo, L. (2017). *Determinación y caracterización de material particulado sedimentable en el casco urbano del cantón Portovelo*. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/27760>
- Cáceres, C. (2018). *Análisis estadístico de la razón entre el pm2.5 y el pm10 de los datos continuos de las estaciones de la red de monitoreo de calidad del aire en bogotá*. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstreams/1a3f27b1-b2a5-4828-88ca-8a7d37e54835/download>
- Carmona, J. (2023). *Estudio técnico económico para suministrar energía eléctrica por incremento de cargas, en las instalaciones elcope s.a.c., pachacamac, lima*. <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/12558>
- Carrillo, H. (2011). “*Diseño y Cálculo de un Sistema de Extracción Localizada de Humos Metálicos y Gases Provenientes del Proceso de Soldadura*.” <file:///C:/Users/moral/Downloads/D-79531.pdf>
- Castillo, E., & Velasquez, S. (2019). Minimización de material particulado generado en el proceso de clinkerización mediante el empleo de filtros de mangas. *Cienc. Tecnol*, 15(3), 169–181. <file:///C:/Users/moral/Downloads/2533-Texto%20del%20art%C3%ADculo-7879-1-10-20190918.pdf>
- Castillo, L., & Rodriguez, C. (2016). *Contaminación del ambiente con material particulado ocasionado por la circulación vial en la construcción de la ptap los angelinos de la ciudad de bucaramanga y sus medidas de mitigación para disminuir la afectación a la población y los recursos naturales*. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://digitk.areandina.edu.co/server/api/core/bitstreams/47c10e32-1a56-452d-8b44-36f619de47a7/content>
- Centro Ecuatoriano de Eficiencia de Recurso. (2022). *Guía de minas y canteras de material pétreo*. <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://asobanca.org.ec/wp-content/uploads/2022/12/12.-Guia-Minas-y-Canteras-de-material-petreo.pdf>
- Congreso Nacional, H. (2004). *Ley de prevención y control de la contaminación ambiental*. www.lexis.ec
- Constitución del Ecuador. (2008). *Constitucion de la republica del ecuador*. In *Registro Oficial* (Vol. 449, Issue 20). <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/09/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador.pdf>

- CORPAIRE. (2004). *Índice Quiteño de Calidad del Aire IQCA*.
[file:///C:/Users/moral/Downloads/INDICEQUITEODELACALIDADDEAIRE%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/moral/Downloads/INDICEQUITEODELACALIDADDEAIRE%20(1).pdf)
- Cuadros, E. (2021). *Factores meteorológicos y su relación con la calidad del aire producido por PM 10 generado en la fabricación de ladrillo artesanal en Cullpa Baja, 2017*.
https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/9782/4/IV_FIN_107_TE_Cuadros_Baldeon_2021.pdf
- Dagnino, J. (2014). *Análisis de varianza*.
<https://revistachilenadeanestesia.cl/PII/revchilanestv43n04.07.pdf>
- Dalmasso, A., Candia, R., & Llera, J. (1997). La vegetación como indicadora de la contaminación por polvo atmosférico. In *MULTEQUINA* (Vol. 6).
<https://www.redalyc.org/pdf/428/42800608.pdf>
- Dávalos, A. (2018). *Contaminación del ecosistema terrestre por material particulado y relaves de plantas procesadoras de la pequeña minería en nasca*.
<https://repositorio.unica.edu.pe/items/41846dce-9af7-4447-8b1c-b757b69b87fc>
- Dávalos, F., & Arévalo, S. (2019). *Evaluación de calidad del aire a través de PM_{2,5} y PM₁ de la ciudad de Guayaquil en período de lluvia y sequía*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://dspace.espol.edu.ec/retrieve/134070/D-CD110093.pdf>
- Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. (2014). *Claves para la Taxonomía de Suelos*. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Spanish-Keys-to-Soil-Taxonomy.pdf>
- Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros. (2007). *Guía para la evaluación de impactos en la calidad del aire por actividades minero metalúrgicas*.
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5217287/Gu%C3%ADa%20para%20la%20Evaluaci%C3%B3n%20de%20Impactos%20en%20la%20Calidad%20del%20Aire%20por%20Actividades%20Minero-Metal%C3%BArgicas.pdf?v=1696276281>
- Dueñas, O. (2023). *Implementación de un sistema de mitigación de material particulado en el proceso de chancado de la unidad minera petranova s.a.c*.
<file:///C:/Users/moral/Downloads/4F.0033.MI.pdf>
- Echeverri, L. (2023). *Evaluación del aporte de fuentes de emisión a la contaminación del aire por material particulado en la zona urbana de Manizales a partir de información de*

caracterización química y modelos de receptor.

https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/84593?utm_source=chatgpt.com

Echeverri, & Maya, G. (2008). *Relación entre las partículas finas (pm2.5) y respirables (pm10) en la ciudad de Medellín* (Vol. 12). <https://www.redalyc.org/pdf/750/75011517002.pdf>

Environmental Protection Agency. (2025, April 7). *Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente*. Environmental Protection Agency.

<https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>

EPA. (2003). *Hoja de Datos EPA-CICA Hoja de Datos-Tecnología de Control de Contaminantes del Aire*. <https://www3.epa.gov/ttnecatc1/dir2/fventurs.pdf>

EPA. (2017). *Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente*.

<https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>

EPA. (2024, December 16). *Tabla NAAQS*. Environmental Protection Agency.

<https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>

Escobar, Jairo. (2002). *La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar*.

CEPAL, División de Recursos Naturales e Infraestructura. chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclclefindmkaj/<https://archivo.cepal.org/pdfs/Waterguide/CL1799S.PDF>

Esri. (2023). *ArcGIS Pro [Software] (3.2)*. <https://www.esri.com>

Figueroa, E., Gómez, A., Jorquera, P., & Labrín, F. (2013). Develando económicamente los impactos sobre la concentración atmosférica de material particulado de un proyecto de remodelación del transporte. In *Estudios de Economía* (Vol. 40).

[https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-](https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-52862013000100003&script=sci_arttext&tlng=pt)

[52862013000100003&script=sci_arttext&tlng=pt](https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-52862013000100003&script=sci_arttext&tlng=pt)

Flores, B. (2019). *Plan de acción minera concesión minera “san José” código 100104013*.

Flores, Sukla, M., Wang, J., & Hernández, B. (2011). *Particulate Matter Dispersed by Vehicles Running on Agricultural Unpaved Roads*. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v29n1/2395-8030-tl-29-01-00023.pdf>

Galagovsky, L. R., Di Giacomo, M. A., & Alí, S. (2015). Estequiometría y ley de conservación de la masa: lo que puede ocultar la simplificación del discurso experto. *Ciência &*

- Educação (Bauru)*, 21(2), 351–360. <https://doi.org/10.1590/1516-731320150020006>
- Gallardo. (2017). *Metodología de la Investigación*. <http://www.continental.edu.pe/>
- Gallardo, L. (1997). *Modelación atmosférica con orientación a dispersión de contaminantes*. https://www.dim.uchile.cl/~lgallard/GF_515_docs/anexo5.pdf
- Galvis, B., & Rojas, N. (2006). Relación entre PM 2,5 y PM 10 en la ciudad de Bogotá. In *ACTA NOVA* (Vol. 3). chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.scielo.org.bo/pdf/ran/v3n2/v3n2_a12.pdf
- Galvis, León, I., Padilla, K., Pombo, M., Rada, M., Brand, J., & Rebolledo, R. (2021). *Material particulado y trastornos de los sistemas cardiovascular y respiratorio en trabajadores de diferentes áreas: una revisión narrativa*. <https://scielo.isciii.es/pdf/medtra/v30n3/1132-6255-medtra-30-03-362.pdf>
- García, J. (2015). *Problemática del material particulado en las minas de carbon a cielo abierto en colombia*. http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/410/1/Garc%C3%ADa_2015_TG.pdf
- Gaviria, C. F., Benavides, P. C., & Tangarife, C. A. (2008). *Contaminación por material particulado (pm 2,5 y pm 10) y consultas por enfermedades respiratorias en Medellín*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<http://www.scielo.org.co/pdf/rfnsp/v29n3/v29n3a04.pdf>
- Gobierno Vasco-Dirección de Planificación Ambiental. (2012). *Guía para la prevención de emisiones difusas de partículas*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/guia_emisiones_difusas/es_doc/adjuntos/guia_emisiones_difusas.pdf
- González, M. (2012). *Calidad del aire en la zona centro y oriente de la ciudad de manizales: influencia del material particulado (pm 10) y lluvia ácida*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/9864/8109506.2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- González Pernía, P. (2014). *Eficiencia en el transporte en minería a cielo abierto. Aplicación a*

- una cantera de caliza*. <http://hdl.handle.net/10651/27928>
- GREENPEACE. (2021, May 11). *Quema de combustibles fósiles y generación de partículas PM2.5*. <https://es.greenpeace.org/es/en-profundidad/los-combustibles-fosiles-tambien-nos-matan/quema-de-combustibles-fosiles-y-generacion-de-particulas-pm2-5/>
- Gutscher, M., Malavieille, J., Lallemand, S., & Collot, J. (1999). *Tectonic segmentation of the north Andean margin : impact of the Carnegie ridge collision*. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/b_fdi_55-56/010021658.pdf
- Hassan, S., Macatangay, R., Chotamonsak, C., Chantara, S., & Surapipith, V. (2024). Understanding the seasonal dynamics of surface PM2.5 mass distribution and source contributions over Thailand. *Atmospheric Environment*, 331. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120613>
- Hernández, J. D., Espinosa, F., Rodríguez, J., Chacón, J., Toloza, C., Arenas, M., Carrillo, S., & Bermúdez, V. (2018). *Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones*. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?>
- Hernández, N., Yuri, J., Yezenia, A., Ferrer, R., & Otaño, J. (2014). *Determinación del método de arranque de la roca en la cantera Pilón, Mayarí*. <https://www.redalyc.org/pdf/2235/223531569003.pdf>
- Hernández, S., Fernández, C., & Babiata, P. (2014). *Metodología De La Investigación*. <https://archive.org/details/hernandez-sampieri/page/n11/mode/2up>
- Instituto Espacial Ecuatoriano. (2013). *Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000*". https://www.geoportalignm.gob.ec/geodescargas/quito/mt_quito_geopedologia.pdf
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI]. (2023). *Datos climáticos de Ibarra, Ecuador*. <https://www.inamhi.gob.ec/>
- Jennifer, Z. (2020). *Determinación de material particulado pm₁₀ y pm_{2.5} producto de la explotación de canteras en el sector san rafael de la ciudad de Latacunga*. <chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcgclclefindmkaj/https://repositorio.utc.edu.ec/server/api/core/bitstreams/996810c1-b08a-4e5a-a335-b2e93e4434da/content>
- Jorba, M., & Vallejo, V. (2010). *Manual para la restauración de canteras de roca caliza en clima mediterráneo*. <chrome->

extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.gencat.cat/mediamb/publicacions/monografies/manual_restauracion_canteras_(cast).pdf

- López, T. (2000). *Efectos ambientales del tráfico urbano: la evaluación de la contaminación atmosférica en madrid*. <https://oa.upm.es/715/>
- MAATE. (2024). *Estudio de impacto ambiental ex - post y plan de manejo ambiental para la fase de explotación de minerales no metálicos, bajo el régimen de pequeña minería de la concesión minera "jm canteras" (cód. 70000210)*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/07/EIA-JM-CANTERAS-2022.pdf>
- Machado, M., & Palacios, C. (2023). *Caracterización de las fuentes de materiales más utilizadas en el Azuay, enfocado hacia su empleo para subbase, base y capas de rodadura*. <file:///C:/Users/moral/Downloads/Trabajo-de-Titulaci%C3%B3n.pdf>
- Manzur, M. E., Benzal, G., & González, S. N. (2012). *Modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos*. http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/149319/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Marin, A., & Zapata, M. (2017). *Usos y aplicaciones de Excel*. <https://repository.icesi.edu.co/server/api/core/bitstreams/d33bc578-d351-4bdc-bcfc-cf58d9255f77/content>
- Martínez, R., Tuya, L., Pérez, A., & Canovas, A. (2009). *Revista Habanera de Ciencias Médicas*. In *Revista Habanera de Ciencias Médicas* (Vol. 8, Issue 2). <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180414044017>
- Meléndez, I. (2016). *Evaluación de emisiones y dispersión de aerosoles atmosféricos provenientes de procesos de extracción de áridos: un caso de estudio*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/188174>
- Mendoza, G. (2020). *Análisis de la concentración de material particulado (pm10) emitido por las actividades de explotación minera de canteras de caliza: caso de estudio cantera la oscurana, Toluviejo - Sucre*. <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/12099>
- Met One Instruments. (2014). *Aerocet 531s manual*. <https://metone.com/wp-content/uploads/2019/10/AEROCET-531S-9800-Rev-H.pdf>
- MeteoBlue AG. (2025). *Pronósticos meteorológica semanal*. *MeteoBlue AG*. <https://www.meteoblue.com/en/weather/week/0.306N-78.101E>

- Ministerio de Obras Públicas, D. G. de A. (1996). *Analisis del efecto del material particulado en aguas de riego. i-ix region. antecedentes preliminares*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/6a25f539-d13a-4951-9dc5-06cc7e5bcbb4/content
- Ministerio del Ambiente. (2011). *ACUERDO No. 050*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/06/ACUERDO-50.pdf
- Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica. (2023). *Acuerdo-Ministerial-Nro.-MAATE-2023-080*. https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/Acuerdo-Ministerial-Nro.-MAATE-2023-080.pdf
- Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica [MAATE]. (2017). *Reforma texto unificado legislacion secundaria, medio ambiente, libro vi, Decreto Ejecutivo 3516, Registro Oficial Suplemento 2, 31/03/2003 Acuerdo Ministerial 97*. https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/Acuerdo-097.pdf
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2014). *Proyecto Calidad del Aire Fase III Año Base 2010 Gobierno Nacional del Ecuador*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/05/Libro-Resumen-Inventario-13-02-2014-prensa.pdf
- Monje, C. (2011). *Metodología de la investigación cuantitativa y cualitativa guía didáctica*. https://www.uv.mx/rmipe/files/2017/02/guia-didactica-metodologia-de-la-investigacion.pdf
- NASA POWER. (2025). *Predicción de la NASA sobre los recursos energéticos mundiales*. https://power.larc.nasa.gov/
- Nguyen, N., Nguyen, H., Le, T., & Vu, C. (2021). Evaluating Low-Cost Commercially Available Sensors for Air Quality Monitoring and Application of Sensor Calibration Methods for Improving Accuracy. *Open Journal of Air Pollution*, 10(01), 1–17. https://doi.org/10.4236/ojap.2021.101001
- NOAA. (2025). *Modelo de hysplit*. https://accounts.noaa.gov/register/#/workflow
- Núñez, R. (2018). *Evaluación del efecto de material particulado en suspensión orientado a la operación mina a partir de la implementación de una red de monitoreo ambiental en minera escondida*. https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/169965/Evaluacion-del-efecto-de-material-particulado-en-suspension-orientado-a-la-operacion-mina-a-

partir.pdf

Oficina Internacional del Trabajo. (1965). *Guía para la prevención y la supresión del polvo en las minas, los túneles y las canteras*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.ilo.org/sites/default/files/wcms_p5/groups/public/@ed_protect/@protrav/@safework/documents/normativeinstrument/wcms_218646.pdf

OMS. (2021). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire*.

<https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/346062/9789240035461-spa.pdf>

OMS. (2024, October 24). *Contaminación del aire ambiente (exterior) y salud*. Organización Mundial de La Salud. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Oñati, G. (2018). *Adecuación del proyecto de explotación de la cantera de Piedracaliza*

“*gomistegui*.” chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/derecho_minero_gomistegui_4790/es_def/adjuntos/proyecto/memoria/MEMORIA-PEX-4.790-2018.pdf

Organización Mundial de la Salud. (2024, October 24). *Contaminación del aire ambiente (exterior) y salud*. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Orralla, A. (2010). “*Diseño de un sistema de extracción de material particulado de una planta de arena (Trituración y Clasificación de polvo)*.” chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/4856/6/UPS-CT001898.pdf

Pabón, S., Benítez, R., Villa, S., & Gallo, J. (2020). *Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción*. <https://doi.org/https://doi.org/>

Paez, P., Cogliati, M., & Giocosa, R. (2017). *Departamento Geografía*. 53–71.

<http://bibliocentral.uncoma.edu.ar/revele/index.php/geografia/index>

Paredes, O., Jiménez, L., Dávila, J., & Apaza, J. (2024). Contaminación y pérdida de biodiversidad por actividades mineras y agropecuarias: estado del arte. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 26(1), 56–66.

<https://doi.org/10.18271/ria.2024.594>

- Pérez, L. (2006). *Herramientas para la investigación científica*.
<https://www.redalyc.org/pdf/1800/180019873015.pdf>
- Pilay, D., & Gavidia, L. (2020). “*Estudio y Diseño de un Ciclón para el Control de Partículas para una Empresa Productora de Libros en la ciudad de Guayaquil.*” chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19120/4/UPS-GT002983.pdf
- Quenta. (2022). *Evaluación del sistema de colector de polvos en la etapa de chancado para minerales cupríferos*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/cc435186-2a2e-4c23-bb22-158415eb1ac2/content
- Regalado, A. (2015). *Caracterización del material particulado del aire ambiente en la ciudad de Loja*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/11108/1/Tesis%20Anabel%20Regalado_%20Lista.pdf
- Robles, E., Medina, A., & Medina, C. (2019). La contaminación del aire por el material particulado y su relación con las enfermedades de tipo respiratorio en la población de Cerro de Pasco (2010 y 2016). *Industrial Data*, 22(1), 173–186.
<https://doi.org/10.15381/idata.v22i1.16533>
- Rojano, R. E., Mendoza, Y. I., Arregoces, H., & Restrepo, G. M. (2016). Dispersión de Contaminantes del Aire (PM10, NO2, CO, COV y HAP) emitidos desde una estación modular de compresión, tratamiento y medición de gas natural. *Informacion Tecnologica*, 27(5), 99–110. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000500012>
- Romero, M., Olite, F., & Álvarez, M. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 44(2), 1–14.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223214848008>
- Rubio, J. (2019). *Monitoreo y evaluación del impacto ambiental del material particulado pm10 y pm2,5 en la universidad politécnica salesiana "campus sur"*.
- Ruiz, M., Uribe, J., & Olivares, J. (2009). Una mirada a la biometria. In *Revista Avances en Sistemas e Informática* (Vol. 6, Issue 2).
<https://www.redalyc.org/pdf/1331/133113598005.pdf>
- Sánchez, E. (2020). *Evaluación sociambiental del material particulado generado por las*

- canteras mediante análisis estadístico y formulación de mitigación en la urbanización bosques de la costa.* chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/SANCHEZ%20LANDAZURI%20EMILIA%20ALEJANDRA%20(1).pdf
- Santillán, P., Rodríguez, M., Orozco, J., Ríos, I., & Bayas, C. (2021). Evaluación de la concentración y distribución espacial de material particulado en los campus de la UNACH - Riobamba. *NOVASINERGIA REVISTA DIGITAL DE CIENCIA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA*, 4(2), 111–126. <https://doi.org/10.37135/ns.01.08.07>
- Secretaria de Ambiente. (2023). *Informe de la calidad del aire 2022*. www.quitoambiente.gob.ec.
- Serna, E. (2021). *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/libro/883060.pdf#page=46>
- Tiktin, J. (1998). *Procedimientos generales de construcción*. https://oa.upm.es/67563/1/procesamiento_aridos_instalaciones.pdf
- Turner, D. (1970). *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*. . Environmental Protection Agency.
- Valenzuela, P., Palma, J., & Vega, S. (2014). *Dust suppressant treatments. Quality control Tratamientos supresores de polvo. Control de calidad* (Vol. 13, Issue 3). https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-915X2014000300004&script=sci_arttext
- Vallejo, C. (2007). *Evolution of the western cordillera in the andes of ecuador (late cretaceous-paleogene)*. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/TE0003.pdf>
- Verdezoto, F., Muyulema, J., Cuba, H., & Serrano, A. (2022). Evaluación temporal del material particulado PM2.5 y PM10 en el Distrito Metropolitano de Quito – Ecuador. *ConcienciaDigital*, 5(4.1), 21–44. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v5i4.1.2393>
- World Health Organization. (2014). *Air Quality and Health*. <https://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/>
- Abadi, A. R. S., Hamzeh, N. H., Kaskaoutis, D. G., Vuillaume, J. F., Shukurov, K. A., & Gharibzadeh, M. (2025). Spatio-Temporal Distribution of PM2.5 and PM10 Concentrations and Assessment of Public Health Risk in the Three Most Polluted Provinces of Iran.

- Sustainability (Switzerland)*, 17(1). <https://doi.org/10.3390/su17010044>
- Acosta, M., Rodríguez, L., Cuitiva, A., Altamar, A., & Aragón, J. (2019). *Comparación de la calidad de aire por pm10 y pm 2.5 con la temperatura y precipitaciones en una zona aledaña a la universidad libre sede bosque en bogotá d.c.*
<https://acofipapers.org/index.php/eiei/article/download/247/243/474>
- Aguilar, P. (2024). Evaluación de los Impactos Ambientales en la Cantera Taparachi Generadas por la Explotación de Materiales Empleados en la Construcción. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 8(2), 1307–1326. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i2.10568
- Alvarado, J., & Cedeño, V. (2024). *Evaluación de la contaminación por emisiones de material particulado proveniente de una cantera en la urbanización bosques de la costa aplicando un modelo de dispersión*. 103. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5374/1/UPS-GT000502.pdf>
- Alvis, E. (2012). *Impacto ambiental generado por el material particulado, sobre la calidad del aire en la zona de influencia de los proyectos carbonífero del departamento del cesar.*
chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/<https://apidspace.javeriana.edu.co/server/api/core/bitstreams/c3f8e689-23a5-41eb-8a61-b454768df3b2/content>
- Angulo, R. (2008). *Medición y Evaluación de la calidad del aire en los sectores de Fertisa y Trinitaria de la ciudad de Guayaquil debido a la presencia de material particulado menor a 10 y 2.5 um.* chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/10669/1/D-39725.pdf>
- Aránguez, E., Ordóñez, M., Serrano, J., Aragonés, N., Fernández, R., Gandarillas, A., & Galán, I. (1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. In *Rev Esp Salud Pública* (Vol. 73). chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://scielo.isciii.es/pdf/resp/v73n2/contam_atmos.pdf
- Arciniégas, C. (2012). *Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable pm 10 **.
http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-24742012000100012
- Arregui, B. (2014). *Sistema de generación eléctrica adelca modelo de dispersión de*

contaminantes atmosféricos.

https://ewsdata.rightsindevelopment.org/files/documents/44/IADB-EC-L1144_hn6IVlw.pdf

Avellaneda, F. (2012). *Apoyo al seguimiento ambiental de las licencias ambientales donde están involucrados equipos como trituración, transporte, banda transportadora, mezcladora en la corporación autónoma regional del Cesar (corpocesar) en la ciudad de Valledupar-Cesar.*

<https://repositorioinstitucional.ufpso.edu.co/xmlui/handle/20.500.14167/1024>

Awos, A., Thompson, S., Adedeji, O., Zvomuya, F., & Zhang, Q. (2024). Monitoring of Air Quality for Particulate Matter (PM2.5, PM10) and Heavy Metals Proximate to a Cement Factory in Ewekoro, Nigeria. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 12(10), 152–180. <https://doi.org/10.4236/gep.2024.1210009>

Ballester, F. (2005). *ontaminación atmosférica, cambio climático y salud.* chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://scielo.isciii.es/pdf/resp/v79n2/colaboracion3.pdf>

Bario, O. (2017). *Contaminación del ambiente por material particulado generado en las obras civiles.* 1–98. <file:///C:/Users/moral/Downloads/T628.53%20B275.pdf>

Barraza, C., & Sánchez, L. (2019). *Evaluación de la concentración de material particulado pm10 en la región norte – centro histórico de la ciudad de barranquilla.*

<https://repositorio.cuc.edu.co/bitstreams/516d39a6-7588-43a6-af36-6dfaa91af34f/download>

Barry, M., & Maesano, I. (2017). Ten principles for climate, environment and respiratory health. In *European Respiratory Journal* (Vol. 50, Issue 6). European Respiratory Society.

<https://doi.org/10.1183/13993003.01912-2017>

Bermudes, C. (2004). *Gestión de la calidad del aire: Causas, Efectos y Soluciones Diseño de Carátula.* chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/libros/mambiente/gest_cal/pdf/t_completo.pdf

Bravo, L. (2017). *Determinación y caracterización de material particulado sedimentable en el casco urbano del cantón Portovelo.* <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/27760>

Cáceres, C. (2018). *Análisis estadístico de la razón entre el pm2.5 y el pm10 de los datos continuos de las estaciones de la red de monitoreo de calidad del aire en bogotá.*

[https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstreams/1a3f27b1-b2a5-4828-88ca-](https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstreams/1a3f27b1-b2a5-4828-88ca-8a7d37e54835/download)

[8a7d37e54835/download](https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstreams/1a3f27b1-b2a5-4828-88ca-8a7d37e54835/download)

- Carmona, J. (2023). *Estudio técnico económico para suministrar energía eléctrica por incremento de cargas, en las instalaciones elcope s.a.c., pachacamac, lima.*
<https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/12558>
- Carrillo, H. (2011). “*Diseño y Cálculo de un Sistema de Extracción Localizada de Humos Metálicos y Gases Provenientes del Proceso de Soldadura.*”
 file:///C:/Users/moral/Downloads/D-79531.pdf
- Castillo, E., & Velasquez, S. (2019). Minimización de material particulado generado en el proceso de clinkerización mediante el empleo de filtros de mangas. *Cienc. Tecnol*, 15(3), 169–181. file:///C:/Users/moral/Downloads/2533-Texto%20del%20art%C3%ADculo-7879-1-10-20190918.pdf
- Castillo, L., & Rodriguez, C. (2016). *Contaminación del ambiente con material particulado ocasionado por la circulación vial en la construcción de la ptap los angelinos de la ciudad de bucaramanga y sus medidas de mitigación para disminuir la afectación a la población y los recursos naturales.* chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://digitk.areandina.edu.co/server/api/core/bitstreams/47c10e32-1a56-452d-8b44-36f619de47a7/content
- Centro Ecuatoriano de Eficiencia de Recurso. (2022). *Guía de minas y canteras de material pétreo.* chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://asobanca.org.ec/wp-content/uploads/2022/12/12.-Guia-Minas-y-Canteras-de-material-petreo.pdf
- Congreso Nacional, H. (2004). *Ley de prevencion y control de la contaminación ambiental.*
www.lexis.ec
- Constitución del Ecuador. (2008). *Constitucion de la republica del ecuador.* In *Registro Oficial* (Vol. 449, Issue 20). chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/09/Constitucion-de-la-Republica-del-Ecuador.pdf
- CORPAIRE. (2004). *Índice Quiteño de Calidad del Aire IQCA.*
 file:///C:/Users/moral/Downloads/INDICEQUITEODELACALIDADDEAIRE%20(1).pdf
- Cuadros, E. (2021). *Factores meteorológicos y su relación con la calidad del aire producido por PM 10 generado en la fabricación de ladrillo artesanal en Cullpa Baja, 2017.*
https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/9782/4/IV_FIN_107_TE_Cuadros_Baldeon_2021.pdf

Dagnino, J. (2014). *Análisis de varianza*.

<https://revistachilenadeanestesia.cl/PII/revchilanestv43n04.07.pdf>

Dalmasso, A., Candia, R., & Llera, J. (1997). La vegetación como indicadora de la contaminación por polvo atmosférico. In *MULTEQUINA* (Vol. 6).

<https://www.redalyc.org/pdf/428/42800608.pdf>

Dávalos, A. (2018). *Contaminación del ecosistema terrestre por material particulado y relaves de plantas procesadoras de la pequeña minería en nasca*.

<https://repositorio.unica.edu.pe/items/41846dce-9af7-4447-8b1c-b757b69b87fc>

Dávalos, F., & Arévalo, S. (2019). *Evaluación de calidad del aire a través de PM_{2,5} y PM₁₀ de la ciudad de Guayaquil en período de lluvia y sequía*. chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://dspace.espol.edu.ec/retrieve/134070/D-CD110093.pdf>

Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. (2014). *Claves para la Taxonomía de Suelos*. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Spanish-Keys-to-Soil-Taxonomy.pdf>

Dirección General de Asuntos Ambientales Mineros. (2007). *Guía para la evaluación de impactos en la calidad del aire por actividades minero metalúrgicas*.

<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/5217287/Gu%C3%ADa%20para%20la%20Evaluaci%C3%B3n%20de%20Impactos%20en%20la%20Calidad%20del%20Aire%20por%20Actividades%20Minero-Metal%C3%BArgicas.pdf?v=1696276281>

Dueñas, O. (2023). *Implementación de un sistema de mitigación de material particulado en el proceso de chancado de la unidad minera petranova s.a.c.*

file:///C:/Users/moral/Downloads/4F.0033.MI.pdf

Echeverri, L. (2023). *Evaluación del aporte de fuentes de emisión a la contaminación del aire por material particulado en la zona urbana de Manizales a partir de información de caracterización química y modelos de receptor*.

https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/84593?utm_source=chatgpt.com

Echeverri, & Maya, G. (2008). *Relación entre las partículas finas (pm_{2.5}) y respirables (pm₁₀) en la ciudad de Medellín* (Vol. 12). <https://www.redalyc.org/pdf/750/75011517002.pdf>

Environmental Protection Agency. (2025, April 7). *Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente*. Environmental Protection Agency.

- <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>
- EPA. (2003). *Hoja de Datos EPA-CICA Hoja de Datos-Tecnología de Control de Contaminantes del Aire*. <https://www3.epa.gov/ttnca1/dir2/fventurs.pdf>
- EPA. (2017). *Efectos del material particulado (PM) sobre la salud y el medioambiente*. <https://espanol.epa.gov/espanol/efectos-del-material-particulado-pm-sobre-la-salud-y-el-medioambiente>
- EPA. (2024, December 16). *Tabla NAAQS*. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naqs-table>
- Escobar, Jairo. (2002). *La contaminación de los ríos y sus efectos en las áreas costeras y el mar*. CEPAL, División de Recursos Naturales e Infraestructura. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/<https://archivo.cepal.org/pdfs/Waterguide/LCL1799S.PDF>
- Esri. (2023). *ArcGIS Pro [Software] (3.2)*. <https://www.esri.com>
- Figueroa, E., Gómez, A., Jorquera, P., & Labrín, F. (2013). Develando econométricamente los impactos sobre la concentración atmosférica de material particulado de un proyecto de remodelación del transporte. In *Estudios de Economía* (Vol. 40). https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-52862013000100003&script=sci_arttext&tlng=pt
- Flores, B. (2019). *Plan de acción minera concesión minera “san josé” código 100104013*.
- Flores, Sukla, M., Wang, J., & Hernández, B. (2011). *Particulate Matter Dispersed by Vehicles Running on Agricultural Unpaved Roads*. <https://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v29n1/2395-8030-tl-29-01-00023.pdf>
- Galagovsky, L. R., Di Giacomo, M. A., & Alí, S. (2015). Estequiometría y ley de conservación de la masa: lo que puede ocultar la simplificación del discurso experto. *Ciência & Educação (Bauru)*, 21(2), 351–360. <https://doi.org/10.1590/1516-731320150020006>
- Gallardo. (2017). *Metodología de la Investigación*. <http://www.continental.edu.pe/>
- Gallardo, L. (1997). *Modelación atmosférica con orientación a dispersión de contaminantes*. https://www.dim.uchile.cl/~lgallard/GF_515_docs/anexo5.pdf
- Galvis, B., & Rojas, N. (2006). Relación entre PM 2,5 y PM 10 en la ciudad de Bogotá. In *ACTA NOVA* (Vol. 3). chrome-

- extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclclefindmkaj/http://www.scielo.org.bo/pdf/ran/v3n2/v3n2_a12.pdf
- Galvis, León, I., Padilla, K., Pombo, M., Rada, M., Brand, J., & Rebolledo, R. (2021). *Material particulado y trastornos de los sistemas cardiovascular y respiratorio en trabajadores de diferentes áreas: una revisión narrativa*. <https://scielo.isciii.es/pdf/medtra/v30n3/1132-6255-medtra-30-03-362.pdf>
- García, J. (2015). *Problemática del material particulado en las minas de carbon a cielo abierto en colombia*. http://repositoriodspace.unipamplona.edu.co/jspui/bitstream/20.500.12744/410/1/Garc%C3%ADa_2015_TG.pdf
- Gaviria, C. F., Benavides, P. C., & Tangarife, C. A. (2008). *Contaminación por material particulado (pm 2,5 y pm 10) y consultas por enfermedades respiratorias en Medellín*. [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclclefindmkaj/http://www.scielo.org.co/pdf/rfnsp/v29n3/v29n3a04.pdf](http://www.scielo.org.co/pdf/rfnsp/v29n3/v29n3a04.pdf)
- Gobierno Vasco-Dirección de Planificación Ambiental. (2012). *Guía para la prevención de emisiones difusas de partículas*. [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclclefindmkaj/https://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/guia_emisiones_difusas/es_doc/adjuntos/guia_emisiones_difusas.pdf](https://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/guia_emisiones_difusas/es_doc/adjuntos/guia_emisiones_difusas.pdf)
- González, M. (2012). *Calidad del aire en la zona centro y oriente de la ciudad de manizales: influencia del material particulado (pm 10) y lluvia ácida*. [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclclefindmkaj/https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/9864/8109506.2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/9864/8109506.2012.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- González Pernía, P. (2014). *Eficiencia en el transporte en minería a cielo abierto. Aplicación a una cantera de caliza*. <http://hdl.handle.net/10651/27928>
- GREENPEACE. (2021, May 11). *Quema de combustibles fósiles y generación de partículas PM2.5*. <https://es.greenpeace.org/es/en-profundidad/los-combustibles-fosiles-tambien-nos-matan/quema-de-combustibles-fosiles-y-generacion-de-particulas-pm2-5/>
- Gutscher, M., Malavieille, J., Lallemand, S., & Collot, J. (1999). *Tectonic segmentation of the north Andean margin : impact of the Carnegie ridge collision*.

https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_7/b_fdi_55-56/010021658.pdf

- Hassan, S., Macatangay, R., Chotamonsak, C., Chantara, S., & Surapipith, V. (2024). Understanding the seasonal dynamics of surface PM_{2.5} mass distribution and source contributions over Thailand. *Atmospheric Environment*, 331. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2024.120613>
- Hernández, J. D., Espinosa, F., Rodríguez, J., Chacón, J., Toloza, C., Arenas, M., Carrillo, S., & Bermúdez, V. (2018). *Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones*. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?>
- Hernández, N., Yuri, J., Yezenia, A., Ferrer, R., & Otaño, J. (2014). *Determinación del método de arranque de la roca en la cantera Pilón, Mayarí*. <https://www.redalyc.org/pdf/2235/223531569003.pdf>
- Hernández, S., Fernández, C., & Babiata, P. (2014). *Metodología De La Investigación*. <https://archive.org/details/hernandez-sampieri/page/n11/mode/2up>
- Instituto Espacial Ecuatoriano. (2013). *Generación de geoinformación para la gestión del territorio a nivel nacional escala 1: 25 000*. https://www.geoportaligm.gob.ec/geodescargas/quito/mt_quito_geopedologia.pdf
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología [INAMHI]. (2023). *Datos climáticos de Ibarra, Ecuador*. <https://www.inamhi.gob.ec/>
- Jennifer, Z. (2020). *Determinación de material particulado pm₁₀ y pm_{2.5} producto de la explotación de canteras en el sector san rafael de la ciudad de Latacunga*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/<https://repositorio.utc.edu.ec/server/api/core/bitstreams/996810c1-b08a-4e5a-a335-b2e93e4434da/content>
- Jorba, M., & Vallejo, V. (2010). *Manual para la restauración de canteras de roca caliza en clima mediterráneo*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/[https://www.gencat.cat/mediamb/publicacions/monografies/manual_restauracion_canteras_\(cast\).pdf](https://www.gencat.cat/mediamb/publicacions/monografies/manual_restauracion_canteras_(cast).pdf)
- López, T. (2000). *Efectos ambientales del tráfico urbano: la evaluación de la contaminación atmosférica en madrid*. <https://oa.upm.es/715/>
- MAATE. (2024). *Estudio de impacto ambiental ex - post y plan de manejo ambiental para la fase de explotación de minerales no metálicos, bajo el régimen de pequeña minería de la*

- concesión minera “jm canteras” (cód. 70000210).* <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2024/07/EIA-JM-CANTERAS-2022.pdf>
- Machado, M., & Palacios, C. (2023). *Caracterización de las fuentes de materiales más utilizadas en el Azuay, enfocado hacia su empleo para subbase, base y capas de rodadura.* <file:///C:/Users/moral/Downloads/Trabajo-de-Titulaci%C3%B3n.pdf>
- Manzur, M. E., Benzal, G., & González, S. N. (2012). *Modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos.* http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/149319/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Marin, A., & Zapata, M. (2017). *Usos y aplicaciones de Excel.* <https://repository.icesi.edu.co/server/api/core/bitstreams/d33bc578-d351-4bdc-bcfc-cf58d9255f77/content>
- Martínez, R., Tuya, L., Pérez, A., & Canovas, A. (2009). *Revista Habanera de Ciencias Médicas.* In *Revista Habanera de Ciencias Médicas* (Vol. 8, Issue 2). <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180414044017>
- Meléndez, I. (2016). *Evaluación de emisiones y dispersión de aerosoles atmosféricos provenientes de procesos de extracción de áridos: un caso de estudio.* <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/188174>
- Mendoza, G. (2020). *Análisis de la concentración de material particulado (pm10) emitido por las actividades de explotación minera de canteras de caliza: caso de estudio cantera la oscurana, Toluvejo - Sucre.* <https://manglar.uninorte.edu.co/handle/10584/12099>
- Met One Instruments. (2014). *Aerocet 531s manual.* <https://metone.com/wp-content/uploads/2019/10/AEROCET-531S-9800-Rev-H.pdf>
- MeteoBlue AG. (2025). *Pronósticos meteorológica semanal.* *MeteoBlue AG.* <https://www.meteoblue.com/en/weather/week/0.306N-78.101E>
- Ministerio de Obras Públicas, D. G. de A. (1996). *Análisis del efecto del material particulado en aguas de riego. i-ix region. antecedentes preliminares.* <chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcgiclfndmkaj/https://bibliotecadigital.ciren.cl/server/api/core/bitstreams/6a25f539-d13a-4951-9dc5-06cc7e5bcbb4/content>
- Ministerio del Ambiente. (2011). *ACUERDO No. 050.* <chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpcgiclfndmkaj/https://www.ambiente.gob.ec/wp->

content/uploads/downloads/2018/06/ACUERDO-50.pdf

Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica. (2023). *Acuerdo-Ministerial-Nro.-MAATE-2023-080*. <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/Acuerdo-Ministerial-Nro.-MAATE-2023-080.pdf>

Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica [MAATE]. (2017). *Reforma texto unificado legislación secundaria, medio ambiente, libro vi, Decreto Ejecutivo 3516, Registro Oficial Suplemento 2, 31/03/2003 Acuerdo Ministerial 97*.

<https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/Acuerdo-097.pdf>

Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2014). *Proyecto Calidad del Aire Fase III Año Base 2010 Gobierno Nacional del Ecuador*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/<https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/05/Libro-Resumen-Inventario-13-02-2014-prensa.pdf>

Monje, C. (2011). *Metodología de la investigación cuantitativa y cualitativa guía didáctica*.

<https://www.uv.mx/rmipe/files/2017/02/guia-didactica-metodologia-de-la-investigacion.pdf>

NASA POWER. (2025). *Predicción de la NASA sobre los recursos energéticos mundiales*.

<https://power.larc.nasa.gov/>

Nguyen, N., Nguyen, H., Le, T., & Vu, C. (2021). Evaluating Low-Cost Commercially Available Sensors for Air Quality Monitoring and Application of Sensor Calibration Methods for Improving Accuracy. *Open Journal of Air Pollution*, 10(01), 1–17.

<https://doi.org/10.4236/ojap.2021.101001>

NOAA. (2025). *Modelo de hysplit*. <https://accounts.noaa.gov/register/#/workflow>

Núñez, R. (2018). *Evaluación del efecto de material particulado en suspensión orientado a la operación mina a partir de la implementación de una red de monitoreo ambiental en minera escondida*. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/169965/Evaluacion-del-efecto-de-material-particulado-en-suspension-orientado-a-la-operacion-mina-a-partir.pdf>

Oficina Internacional del Trabajo. (1965). *Guía para la prevención y la supresión del polvo en las minas, los túneles y las canteras*. chrome-

extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://www.ilo.org/sites/default/files/wcms_p5/groups/public/@ed_protect/@protrav/@safework/documents/normativeinstrument/wcms_218646.pdf

- OMS. (2021). *Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire*.
<https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/346062/9789240035461-spa.pdf>
- OMS. (2024, October 24). *Contaminación del aire ambiente (exterior) y salud*. Organización Mundial de La Salud. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Oñati, G. (2018). *Adecuación del proyecto de explotación de la cantera de piedra caliza "gomistegui."* chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.euskadi.eus/contenidos/informacion/derecho_minero_gomistegui_4790/es_def/adjuntos/proyecto/memoria/MEMORIA-PEX-4.790-2018.pdf
- Organización Mundial de la Salud. (2024, October 24). *Contaminación del aire ambiente (exterior) y salud*. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- Orralla, A. (2010). *"Diseño de un sistema de extracción de material particulado de una planta de arena (Trituración y Clasificación de polvo.)"* chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/4856/6/UPS-CT001898.pdf>
- Pabón, S., Benítez, R., Villa, S., & Gallo, J. (2020). *Contaminación del agua por metales pesados, métodos de análisis y tecnologías de remoción*. <https://doi.org/https://doi.org/>
- Paez, P., Cogliati, M., & Giocosa, R. (2017). *Departamento Geografía*. 53–71.
<http://bibliocentral.uncoma.edu.ar/revele/index.php/geografia/index>
- Paredes, O., Jiménez, L., Dávila, J., & Apaza, J. (2024). Contaminación y pérdida de biodiversidad por actividades mineras y agropecuarias: estado del arte. *Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research*, 26(1), 56–66.
<https://doi.org/10.18271/ria.2024.594>
- Pérez, L. (2006). *Herramientas para la investigación científica*.
<https://www.redalyc.org/pdf/1800/180019873015.pdf>
- Pilay, D., & Gavidia, L. (2020). *"Estudio y Diseño de un Ciclón para el Control de Partículas para una Empresa Productora de Libros en la ciudad de Guayaquil."* chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/19120/4/UPS-GT002983.pdf>

- Quenta. (2022). *Evaluación del sistema de colector de polvos en la etapa de chancado para minerales cupríferos*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/cc435186-2a2e-4c23-bb22-158415eb1ac2/content
- Regalado, A. (2015). *Caracterización del material particulado del aire ambiente en la ciudad de Loja*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/11108/1/Tesis%20Anabel%20Regalado_%20Lista.pdf
- Robles, E., Medina, A., & Medina, C. (2019). La contaminación del aire por el material particulado y su relación con las enfermedades de tipo respiratorio en la población de Cerro de Pasco (2010 y 2016). *Industrial Data*, 22(1), 173–186. <https://doi.org/10.15381/idata.v22i1.16533>
- Rojano, R. E., Mendoza, Y. I., Arregoces, H., & Restrepo, G. M. (2016). Dispersión de Contaminantes del Aire (PM10, NO2, CO, COV y HAP) emitidos desde una estación modular de compresión, tratamiento y medición de gas natural. *Informacion Tecnologica*, 27(5), 99–110. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642016000500012>
- Romero, M., Olite, F., & Álvarez, M. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología*, 44(2), 1–14. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223214848008>
- Rubio, J. (2019). *Monitoreo y evaluación del impacto ambiental del material particulado pm10 y pm2,5 en la universidad politécnica salesiana "campus sur"*.
- Ruiz, M., Uribe, J., & Olivares, J. (2009). Una mirada a la biometria. In *Revista Avances en Sistemas e Informática* (Vol. 6, Issue 2). <https://www.redalyc.org/pdf/1331/133113598005.pdf>
- Sánchez, E. (2020). *Evaluación sociambiental del material particulado generado por las canteras mediante análisis estadístico y formulación de mitigación en la urbanización bosques de la costa*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/SANCHEZ%20LANDAZURI%20EMILIA%20ALEJANDRA%20(1).pdf
- Santillán, P., Rodríguez, M., Orozco, J., Ríos, I., & Bayas, C. (2021). Evaluación de la concentración y distribución espacial de material particulado en los campus de la UNACH -

- Riobamba. *NOVASINERGIA REVISTA DIGITAL DE CIENCIA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA*, 4(2), 111–126. <https://doi.org/10.37135/ns.01.08.07>
- Secretaria de Ambiente. (2023). *Informe de la calidad del aire 2022*.
www.quitoambiente.gob.ec.
- Serna, E. (2021). *Desarrollo e Innovación en Ingeniería*.
<https://dialnet.unirioja.es/descarga/libro/883060.pdf#page=46>
- Tiktin, J. (1998). *Procedimientos generales de construcción*.
https://oa.upm.es/67563/1/procesamiento_aridos_instalaciones.pdf
- Turner, D. (1970). *Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates*. . Environmental Protection Agency.
- Valenzuela, P., Palma, J., & Vega, S. (2014). *Dust suppressant treatments. Quality control Tratamientos supresores de polvo. Control de calidad* (Vol. 13, Issue 3).
https://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0718-915X2014000300004&script=sci_arttext
- Vallejo, C. (2007). *Evolution of the western cordillera in the andes of ecuador (late cretaceous-paleogene)*. <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/TE0003.pdf>
- Verdezoto, F., Muyulema, J., Cuba, H., & Serrano, A. (2022). Evaluación temporal del material particulado PM2.5 y PM10 en el Distrito Metropolitano de Quito – Ecuador.
ConcienciaDigital, 5(4.1), 21–44. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v5i4.1.2393>
- World Health Organization. (2014). *Air Quality and Health*.
<https://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/en/>

CAPÍTULO IX

ANEXOS

Anexos 1.

Registro fotográfico del proceso de monitoreo

Proceso de extracción



Planta de trituración



Punto externo



Almacenamiento y carga

Nota. Registro fotográfico corresponde al proceso de medición de material particulado realizado con el equipo AEROCET 531S en los diferentes puntos de la cantera San José: zona de extracción, planta de trituración, área de carga y almacenamiento, y punto externo a 100 metros.

Anexos 2.*Documentación fotográfica del sitio de muestreo*

Nota. Se incluyen imágenes generales de la cantera San José, que muestran las zonas de operación minera, el entorno y las condiciones visuales de generación de polvo.

Anexos 3.*Mediciones de material particulado de la cantera "San José"*

- 1=Zona de extracción
- 2= Planta de trituración
- 3= almacenamiento y Carga
- 4= Punto externo a 100 metros

Semana 1

		SEMANA 2							
		12/5/2025		13/5/2025		14/5/2025		18/5/2025	
Punto de muestreo	Horario	PM2.5 (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)	PM2.5 (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)	PM2.5 (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)	PM2.5 (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)
1	8:00 a. m.	21,7	76,3	16,5	62,9	14,6	61,2	7,1	33,5
	12:00 p. m.	19,1	95,4	14,3	83,6	12,2	89,5	18,5	43,1
	15:00 p. m.	17,8	69	13,6	60,5	11,4	65,2	12,5	72,2
2	8:00 a. m.	16	45,1	11,9	39,8	12,5	56,5	5,7	33,5
	12:00 p. m.	9,4	24,3	6,1	18,5	6,7	26,6	9,1	26,6
	15:00 p. m.	10,7	30,2	8	22,6	9,3	33,5	10,8	41
3	8:00 a. m.	14,6	68,2	9,8	75,1	11,5	72,9	8,2	21,8
	12:00 p. m.	30,2	61,4	34,6	58,7	28,1	66,2	14,6	25,7
	15:00 p. m.	27,3	78,1	20,6	84,2	31,9	93,3	12,7	32,1
4	8:00 a. m.	6,3	28,4	4,8	41,7	9,4	35,6	3,9	39,5
	12:00 p. m.	18,7	72,3	11,2	63,1	13,1	66,9	7	34,2
	15:00 p. m.	11,4	38,9	6,8	27,4	9,3	33,5	5,5	21,4

Semana 2

		SEMANA 2							
		12/5/2025		13/5/2025		14/5/2025		18/5/2025	
Punto de muestreo	Horario	PM2.5 (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)	PM2.5 (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)	PM2.5 (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)	PM2.5 (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)
1	8:00 a. m.	21,7	76,3	16,5	62,9	14,6	61,2	7,1	33,5
1	12:00 p. m.	19,1	95,4	14,3	83,6	12,2	89,5	18,5	43,1
1	15:00 p. m.	17,8	69	13,6	60,5	11,4	65,2	12,5	72,2
2	8:00 a. m.	16	45,1	11,9	39,8	12,5	56,5	5,7	33,5
2	12:00 p. m.	9,4	24,3	6,1	18,5	6,7	26,6	9,1	26,6
2	15:00 p. m.	10,7	30,2	8	22,6	9,3	33,5	10,8	41
3	8:00 a. m.	14,6	68,2	9,8	75,1	11,5	72,9	8,2	21,8
3	12:00 p. m.	30,2	61,4	34,6	58,7	28,1	66,2	14,6	25,7
3	15:00 p. m.	27,3	78,1	20,6	84,2	31,9	93,3	12,7	32,1
4	8:00 a. m.	6,3	28,4	4,8	41,7	9,4	35,6	3,9	39,5
4	12:00 p. m.	18,7	72,3	11,2	63,1	13,1	66,9	7	34,2
4	15:00 p. m.	11,4	38,9	6,8	27,4	9,3	33,5	5,5	21,4

Semana 3

		SEMANA 3							
		19/5/2025		20/5/2025		21/5/2025		22/5/2025	
Punto de muestreo	Horario	PM2.5 (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)	PM2.5 (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)	PM2.5 (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)	PM2.5 (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)
1	8:00 a. m.	32,9	68,3	29,1	79,1	28,7	62,7	33,1	76,9
	12:00 p. m.	39,3	75,6	36,2	88,6	36	77,9	45,2	95,7
	15:00 p. m.	41,2	89	43,2	87,4	26,3	60,1	31,4	85,2
2	8:00 a. m.	28,2	86,9	29,3	71,1	28,8	74	27,6	81,5
	12:00 p. m.	35	94,4	38,7	96	47,9	91,9	42	91,4
	15:00 p. m.	39,2	80,6	36,9	87,5	29,7	82,5	38,4	82,6
3	8:00 a. m.	34,9	76,7	31,7	65,3	31,5	84,9	34,6	81,2
	12:00 p. m.	41,6	95,2	33,2	87,1	47,2	93,3	32,5	76,5
	15:00 p. m.	27,9	64,2	38	83,6	35,7	81,1	29,2	71,8
4	8:00 a. m.	21,1	32,4	18,3	54,7	16,8	36,4	17,1	47,4
	12:00 p. m.	19,9	58,9	12,5	34,2	12,7	33,5	22,1	53,5
	15:00 p. m.	16,1	45,1	17,2	36,1	11	36,8	17,7	76,6

Semana 4

		SEMANA 3							
		26/5/2025		27/5/2025		29/5/2025		31/5/2025	
Punto de muestreo	Horario	PM2.5 (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)	PM2.5 (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)	PM2.5 (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)	PM2.5 (µg/m ³)	PM10 (µg/m ³)
1	8:00 a. m.	12,5	41,5	9,4	49,4	14	84,6	17,2	53,2
	12:00 p. m.	20	86,7	29,9	83,9	38,1	97,2	25,6	69,3
	15:00 p. m.	19,6	35,2	25,1	65,7	48,3	98,4	31,6	72,8
2	8:00 a. m.	15,1	37,1	19,4	67,7	11,5	82,1	28,7	87,9
	12:00 p. m.	23,3	63,2	12,6	74,6	21,9	73,4	43,2	78,9
	15:00 p. m.	21,3	41,4	12,8	71,9	36,4	88,9	29	53,1
3	8:00 a. m.	8,4	26,7	22,5	68,5	7,8	83	5,8	43,6
	12:00 p. m.	17,1	83,2	17	75,7	25,9	81,3	39,6	74
	15:00 p. m.	10,5	18,8	26,5	81,6	17,6	67,4	27	78,8
4	8:00 a. m.	4,1	16,9	7,4	23,7	4,6	27,5	4,4	33,5
	12:00 p. m.	7,6	30,2	5,3	32,6	9,8	19,5	19,2	31
	15:00 p. m.	8,1	15,5	5,6	28,7	4,8	56,4	17,3	33,8

Nota. Se muestran las concentraciones de material particulado PM_{2.5} y PM₁₀ obtenidas en los cuatro puntos de monitoreo establecidos en la cantera San José, las mediciones se realizaron bajo un diseño de muestreo sistemático, con tres turnos de medición diarios, a lo largo de cuatro semanas. Los valores son contrastados con los límites máximos permisibles establecidos por el Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica [MAATE] (2017), aplicables para promedios móviles de 24 horas.