

“Evaluation of Meteorological Variables and Their Influence on Air Quality at the La Oroya Metallurgical Complex in the District of La Oroya, Yauli Province, Junín, Peru”

Jaqueline Heidy Chirre-Flores¹, Roberto Robles-Calderón², Julian Díaz-Ruiz¹, Isabel Chino-de-la-Cruz³, Marieta Eliana Cervantes-Peralta¹

¹Universidad Privada del Norte, Lima-Perú, jaqueline.chirre@upn.pe, ²Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima-Perú, rroblesc1@unmsm.edu.pe, ¹Universidad Privada del Norte, Lima-Perú, julian.diaz@upn.edu.pe, ³Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú, isabel.chino.d@uni.pe, ¹Universidad Privada del Norte, Lima-Perú, marieta.cervantes@upn.pe

Abstract– This research project aims to evaluate environmental air quality parameters and analyze the influence of meteorological variables within the district of La Oroya, Yauli Province, Junín Department, Peru, during April 2025. The analysis of air quality parameters, particularly sulfur dioxide (SO_2), together with environmental monitoring, constitutes essential and fundamental tools for assessing environmental impacts and implementing environmental management measures related to air pollution processes. Objectives: One of the main objectives of this study is to analyze the SO_2 parameter and determine the influence of meteorological variables on the concentration and dispersion of SO_2 in the environment of Junín, in order to establish preventive measures against pollution. Methods: The methodology applied consisted of data analysis and collection from the database of the Environmental Surveillance Center of the OEFA – La Oroya Metallurgical Complex, focusing on SO_2 parameters and meteorological variables. Results: The 24-hour concentrations of sulfur dioxide (SO_2) recorded in April 2025 exceeded the reference Air Quality Standard (ECA) value of $250 \mu g/m^3$ (Supreme Decree No. 003-2017-MINAM) on one occasion. Likewise, the air quality standard for sulfur dioxide of $250 \mu g/m^3$ (Supreme Decree No. 003-2017-PCM) was exceeded. The maximum 24-hour SO_2 concentration was $255.3 \mu g/m^3$, recorded on April 26, 2025. Conclusions: During the monitoring period of April 2025 at the environmental monitoring station CA-CC-01, wind direction showed a predominance from the west (W) with a monthly frequency of 23.3%, followed by west-southwest (WSW) winds with 14.6%.

Keywords- Environmental Assessment, Air Quality Parameters, PM10, Meteorological Variables, Environmental Monitoring.

“Evaluación de las variables meteorológicas y su influencia en la calidad del aire en el complejo metalúrgico La Oroya en el distrito La Oroya, provincia de Yauli, Junin, Peru”

Abstract– Resumen. - *El presente proyecto de investigación tiene como objetivo la evaluación de los parámetros ambientales de calidad del aire y el análisis de la influencia de variables meteorológicas en el ámbito de distrito de La Oroya, provincia de Yauli, departamento de Junin, Peru durante el mes de abril del 2025. Los análisis de parámetros de calidad de aire con respecto al SO₂ junto con el monitoreo ambiental constituyen instrumentos fundamentales y necesarios para evaluar impactos ambientales y adoptar medidas de gestión ambiental referente a proceso de contaminación del aire. Objetivos: uno de los objetivos del presente estudio es analizar el parámetro SO₂ y determinar la influencia de las variables meteorológicas en la concentración y dispersión de SO₂ en el medio ambiente de Junin, con el fin de determinar medidas de prevención frente a la contaminación. Métodos: La metodología que se aplicó fue la de análisis y recopilación de datos desde la base de datos del Centro de Vigilancia Ambiental de la OEFA – Complejo Metalúrgico de La Oroya, sobre parámetros de SO₂ y variables meteorológicas. Resultados: Las concentraciones durante 24 horas de dióxido de azufre (SO₂), obtenidas en abril de 2025, excedieron en una (1) ocasión el valor del ECA para aire referencial de 250 µg/m³ (Decreto Supremo N.º 003- 2017-MINAM). Por otro lado, se excedió el ECA de aire de dióxido de azufre de 250 µg/m³ (Decreto Supremo N.º003-2017-PCM). La máxima concentración durante 24 horas de SO₂ fue de 255,3 µg/m³ registrado el 26 de abril de 2025. Conclusiones: Se identificaron durante el periodo de monitoreo de abril de 2025 en la estación de monitoreo ambiental CA-CC-01, la dirección del viento tuvo una predominancia desde el oeste (W) con una frecuencia mensual de 23.3%, seguido de vientos del oeste suroeste (WSW) con 14.6%.*

Palabras Clave: *Evaluación Ambiental, Parámetros de Calidad del Aire, PM₁₀, Variables Meteorológicas, Monitoreo Ambiental.*

I. INTRODUCCIÓN

La presente Investigación es sobre la evaluación del parámetro ambiental de SO₂ y el análisis de la influencia de variables meteorológicas en el distrito y provincia de Yauli, durante el mes de abril del 2025. El análisis de parámetros de calidad del aire junto con el monitoreo ambiental constituye medios fundamentales y necesarios para evaluar impactos ambientales para adoptar medidas de gestión ambiental referente a procesos de contaminación del aire [1]. Uno de los objetivos del presente estudio es analizar el parámetro de calidad del aire con respecto al SO₂ y determinar la influencia de variables meteorológicas en la concentración y dispersión de material particulado en el ámbito del Complejo Metalúrgico La Oroya con el fin de determinar medidas de mitigación frente a la contaminación. La metodología que se aplicó fue el de análisis y recopilación de datos desde la base

de datos del Centro de Vigilancia Ambiental de la OEFA – Complejo Metalúrgico La Oroya – sobre parámetros de material particulado y variables meteorológicas, luego se procedió a realizar el análisis descriptivo, posteriormente los resultados fueron comparados con Estándares de Calidad Ambiental para aire (OEFA:2025). Los resultados presentan las concentraciones durante 24 horas de dióxido de azufre (SO₂), obtenidas en abril de 2025, excedieron en una (1) ocasión el valor del ECA para aire referencial de 250 µg/m³ [2]. Por otro lado, se excedió el ECA de aire con dióxido de azufre de 250 µg/m³ (Decreto Supremo N.º003-2017- PCM). La máxima concentración durante 24 horas de SO₂ fue de 255,3 µg/m³ registrado el 26 de abril de 2025.

II. METODOLOGÍA

Diseño del estudio: Descriptivo, experimental.

Materiales y Equipo

Materiales

01 USB

Estándares de Calidad del Aire DS N° 003-2017

ISO 900.030 Gestión Ambiental. Método de Referencia para la determinación de material particulado [3]

Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire D.S N° 010- 2019-MINAM

Cuaderno de apuntes

Equipos

01 cámara Fotográfica

01 computadora

Software

Excel

ArcGIS

Software Plataforma PIFA Centro de Vigilancia Ambiental- OEFA

Base de Datos Estación Complejo Metalúrgico La Oroya. OEFA, 2025

Base de datos Estación SENAMHI.

A. Protocolo de Monitoreo

TABLA I

PROTOCOLO DE MONITOREO						
Matr iz	Protocolo	Sección	País	Institución	Dispositivo legal	Año
Aire	Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire	Todo el documento	Perú	MINAM	Decreto Supremo N.º 010-2019-MINAM	2019

B. Ubicación de estaciones de monitoreo

TABLA II

ESTACIÓN DE MONITOREO					
Nº	Código	Coordenadas UTM WGS-84 Zona 18L		Altitud (m s. n. m.)	Descripción
		Este (m)	Norte (m)		
1	CA-CC-01	481757	8726374	3728	Calle comandante Zárate cuadra N° 1 – La Oroya, anexada al local de la Oficina de la Municipalidad Provincial de Yauli, aproximadamente a 850 m al noroeste (NW) del Complejo Metalúrgico de La Oroya (en adelante CMLO).

C. Equipos, materiales y metodologías de análisis

TABLA III

EQUIPOS UTILIZADOS EN LA ESTACIÓN DE MONITOREO CA-CC-01

Parámetro	Equipo	Marca	Modelo	Serie	Certificado de calibración
Dióxido de azufre (SO ₂)	Analizador continuo de gases	Thermo Scientific	43i	143233856	LGA-050-2024
Velocidad de viento Dirección de viento Humedad relativa Temperatura ambiente Precipitación Presión barométrica	Estación meteorológica	Campbell Scientific	CR1000	1521	CHLTH-548-2024 CHLTH-547-2024

Los certificados de calibración de los analizadores de gases y estación meteorológica se encuentran en el Anexo 4.

D. Metodologías de análisis de la calidad del aire

TABLA IV

MÉTODOS DE ANÁLISIS DE AIRE		
Parámetro	Método	Técnica Empleada
Dióxido de azufre (SO ₂)	Norma Técnica Peruana NTP-ISO 10498:2017 y NTP-ISO 10498:2017/Amd.1:2021 (Método: automático)	Fluorescencia ultravioleta
Velocidad de viento Dirección de viento Humedad relativa Temperatura ambiente Precipitación Presión barométrica	Método automático	

E. Criterios de Evaluación

TABLA V

ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA) PARA AIRE					
Parámetro	Periodo	Formato de evaluar		Método de análisis	Norma
		Valor	Criterios de evaluación		
Dióxido de azufre (SO ₂)	24 horas	365	Media aritmética	Fluorescencia ultravioleta (método automático)	R.D. N.º 272-2015-MEM-DGAAM: Lineamientos de Gestión Ambiental Correctiva del CMLO. D.S. N.º 074-2001-PCM: Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire.
	24 horas	250	No exceder más de 7 veces al año		D.S. N.º 003-2017-MINAM: Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y Disposiciones Complementarias.
	24 horas	>500 (cuidado) >1500 (peligro) >2500 (emergencia)	Media móvil de 3 horas		D.S. N.º 009-2003-SA: Reglamento de los Niveles de Estados de Alerta Nacionales para Contaminantes del Aire.

III. RESULTADOS

Se presentan los resultados de la evaluación ambiental de seguimiento para el dióxido de azufre (SO₂) y parámetros meteorológicos, obtenidos en la estación de monitoreo CA-CC-01, instalada dentro del área de influencia del complejo metalúrgico La Oroya, ubicada en el distrito La Oroya, provincia de Yauli, departamento de Junín.

A. Parámetros meteorológicos de la estación de monitoreo CA-CC-01

En la Tabla VI se presenta el resumen mensual de resultados de los parámetros meteorológicos horarios, tales como presión atmosférica, precipitación, temperatura ambiental, humedad relativa y velocidad del viento obtenidos en la estación de monitoreo CA-CC-01 durante Abril de 2025. Los valores horarios de dichos parámetros se presentan en el anexo 3 (Tabla 3 Datos Meteorológicos horarios).

TABLA VI
PARÁMETROS METEOROLÓGICOS HORARIOS REGISTRADOS EN LA
ESTACIÓN DE MONITOREO CA-CC-01 DURANTE ABRIL DEL 2025.

Valor	Presión atmosférica (hPa)	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)
Mínimo	645.7	0.0	3.8	18.1	0.1
Máximo	653.0	5.8	20.5	50.0	3.4
Promedio	648.9	-	10.1	35.6	1.2
Acumulado	-	82.0	-	-	-

En la Figura 1 se presenta la rosa de los vientos de abril de 2025 de la estación CA-CC-01, donde la predominancia de los vientos (procedencia) fue desde el oeste (W) con una frecuencia mensual de 23,3%, seguido de vientos del oeste suroeste (WSW) con 14,6%.

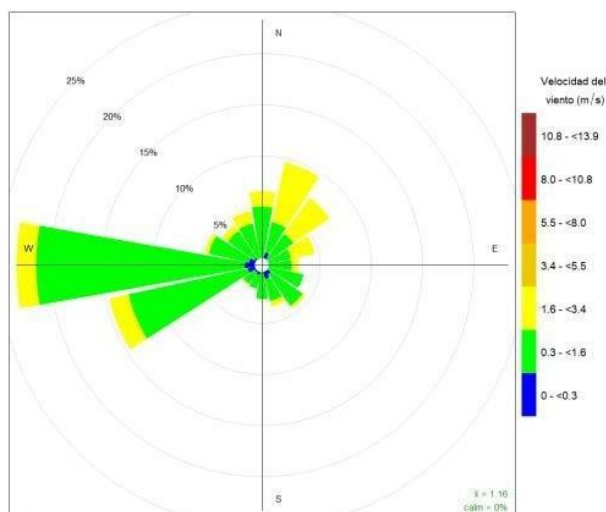


Fig. 1 Diagrama de rosa de los vientos de la estación CA-CC-01
Nota: Las paletas indican la dirección de donde provienen los vientos.

En la Figura 2 se grafican las rosas de vientos por horas de la estación de monitoreo CACC-01, del 1 al 30 de abril de 2025. Se aprecia principalmente que:

- Los vientos procedentes del oeste (W), se dieron desde las 0:00 horas hasta las 8:00 horas con velocidades de viento de hasta 1,8 m/s y desde las 20:00 horas hasta las 23:00 horas con velocidades de viento de hasta 2,3 m/s, donde las horas de mayor predominancia se dieron desde las 0:00 horas hasta las 6:00 horas.
- Los vientos procedentes del oeste suroeste (WSW), se dieron desde las 00:00 horas hasta las 10:00 horas con velocidades de viento de hasta 1,7 m/s y desde las 19:00 horas hasta las 23:00 horas con velocidades de viento de hasta 2,5 m/s.
- Los vientos procedentes del sur sureste (SSE), sureste (SE) y este sureste (ESE), se dieron desde las 8:00 horas hasta las 12:00 horas con velocidades de viento de hasta 2,4 m/s.
- Los vientos procedentes del oeste (W) tuvieron una predominancia mensual de 23,3%; del oeste suroeste (WSW) de 14,6%; del norte noreste (NNE) de 9,6%; del noreste (NE) de 7,4%; del oeste noroeste (WNW) de 5,0%; del norte noroeste (NNW) de 4,7%; del este noreste (ENE) de 4,6%; del sureste (SE) de 4,3%; del sur sureste SSE de 3,6%; del este sureste (ESE) de 3,5%; del sur (S) de 2,6%; entre otras direcciones de menor predominancia.

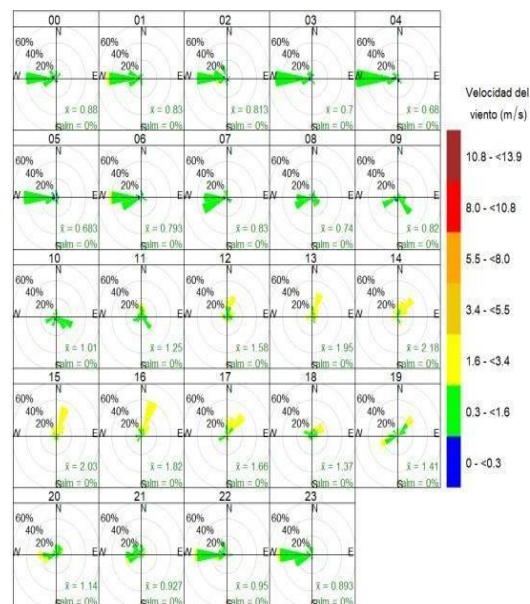


Fig. 2 Rosas de vientos por horas en abril de 2025
Nota: Las paletas indican la dirección de procedencia de los vientos (dirección de predominancia).

B. Concentraciones de Dióxido de azufre (SO₂)

En la Figura 3 se presentan las concentraciones horarias de SO₂ del 1 al 30 de abril de 2025. Las concentraciones oscilaron de una mínima de 5,79 µg/m³ registrado el 3 de abril

a las 19:00 horas y máxima concentración de 2183,67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que se registró el 7 de abril a las 14:00 horas. Se observó una segunda concentración alta de 2079,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que se registró el 26 de abril a las 19:00 horas. Las concentraciones horarias de SO_2 no fueron comparadas con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para aire específicos para el CMLO1, porque esta norma no contempla concentraciones de SO_2 para periodos de 1 hora).

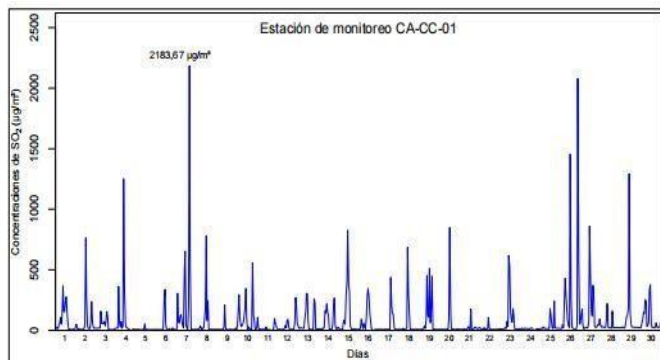


Fig. 3 Concentraciones Horarias de SO_2 en la estación CA-CC-01 en abril de 2025

Cabe indicar que, las actividades del CMLO se encontraban paralizadas desde 15 de marzo del 2021, desde dicha paralización se habían observado bajas concentraciones horarias de SO_2 , es así como, desde el 15 de marzo del 2021 hasta diciembre del 2022 se tuvo una concentración promedio de 9,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y de marzo a octubre del 2023 (a excepción del 10 al 30 de abril de 2023), se tuvo una concentración promedio de 9,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, donde no se han observado emisiones del CMLO.

Asimismo, según el inventario de emisiones de la ciudad La Oroya 3, se tienen 3 sectores potenciales de emisiones del parámetro dióxido de azufre (SO_2); como:

- Fuentes puntuales (proceso de fundición polimetálica del CMLO);
- Fuentes de área (actividades comerciales y de servicios como pollerías, restaurantes, chicharronerías, panaderías, que utilizan en su proceso de combustión kerosene, gas licuado de petróleo y diesel 2; y grifos); y
- Fuentes móviles (buses, camiones, trailers, automóviles y camionetas).

Mediante carta del 16 de marzo de 2024 (Registro: 2024-E01- 032194) de Metalurgia Business Perú S.A.A. (titular del Complejo Metalúrgico de La Oroya), manifiesta que, del sábado 16 de marzo del 2024, se ha realizado el “reinicio efectivo de sus operaciones en el circuito de zinc (TLR) y el inicio de la Marcha Verde”. Sin embargo, desde el 15 de marzo de 2024, se han tenido incrementos en las concentraciones de SO_2 superando inclusive los estados de alerta de cuidado.

En la Figura 4 se presenta la evolución de las concentraciones de SO_2 en (a) promedios horarios por días de

la semana, (b) promedio horario en 24 horas, (c) promedio diario durante la semana, de la estación de vigilancia CA-CC-01 del 1 al 30 de abril de 2025 y (d) promedio mensual de SO_2 de mayo de 2024 a abril de 2025 (concentraciones promedio de SO_2 de los últimos 12 meses); se observa (a, b) que durante el mes, se han presentado casi a diario incrementos de las concentraciones horarias de SO_2 , dichos incrementos, se dieron desde las 6:00 horas hasta las 12:00 horas, desde las 13:00 horas hasta las 15:00 horas y desde las 18:00 horas hasta las 21:00 horas; generalmente, las concentraciones horarias de SO_2 más altas, se han registrado desde las 8:00 horas hasta las 10:00 horas; a las 14:00 horas y 19:00 horas, presentándose picos de 2183,67 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (14:00 horas del 7/04/25); 2079,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (19:00 horas del 26/04/25); 1454,94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (10:00 horas del 26/04/25); 1293,34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (8:00 horas del 29/04/25); 1251,44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (8:00 horas del 4/04/25) y 859,33 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (9:00 horas del 27/04/25); entre otras concentraciones menores. En (a, c) las mayores concentraciones promedio diarias de SO_2 durante la semana, han sido en sábado y lunes. Así mismo, (d) desde el reinicio de las operaciones del circuito de zinc del CMLO en marzo de 2024, en promedio las concentraciones mensuales de SO_2 más altas se dieron de diciembre del 2024 a abril del 2025 y el mes con la menor concentración de SO_2 fue en octubre de 2024.

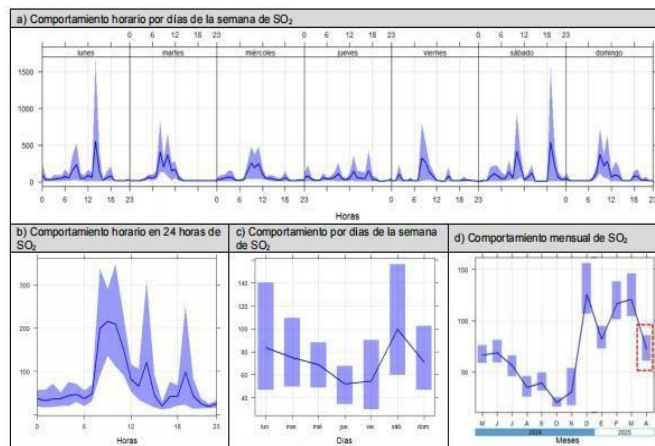


Fig. 4 Concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) del SO_2 promediadas: a) horas en días de la semana, b) promedio horario en 24 horas, c) promedio diario en días de la semana y d) promedio mensual de mayo de 2024 a abril de 2025, en la estación CA-CC-01.

En la Figura 5 se presentan las concentraciones de 24 horas de SO_2 de la estación de monitoreo ambiental CA-CC-01, del 1 al 30 de abril de 2025. Las concentraciones oscilaron entre 9,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (registrado el 5 de abril de 2025) a 255,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (registrado el 26 de abril de 2025), las cuales, excedió el ECA para aire referencial en una (1) ocasión (valor ECA de 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ del 2017); por otro lado, no excedió el valor del ECA de aire específicos para el CMLO (valor de 365 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Ver Anexo 3 (Tabla 3.1. Concentraciones horarias y de 24 horas de SO_2).

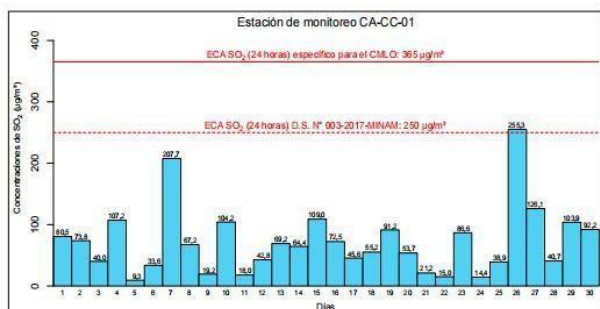


Fig. 5 Concentraciones de 24 horas de SO₂ en la estación CA-CC-01

En la Figura 6 se presentan las concentraciones en promedio móvil de 3 horas de SO₂ en abril del 2025 comparado con los niveles de estado de alerta nacional para SO₂ (Estado de cuidado: 500 µg/m³, estado de peligro: 1500 µg/m³ y estado de emergencia: 2500 µg/m³). Las concentraciones en promedio móvil de 3 horas de SO₂ oscilaron de 6,03 µg/m³ a 960,22 µg/m³, las cuales superaron los estados de alerta de cuidado en diecisiete (17) ocasiones.

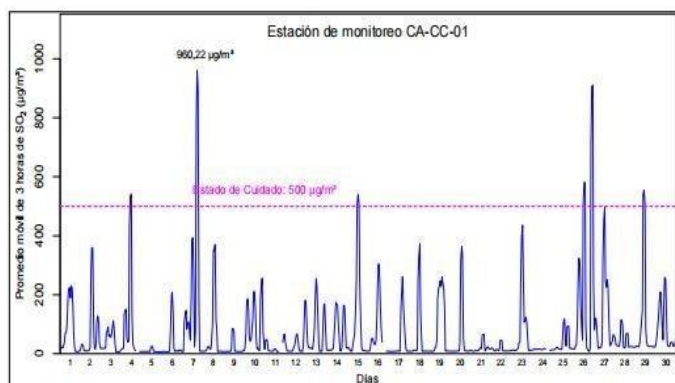


Fig. 6 Concentraciones promedio móvil de 3 horas de SO₂ en la estación CA-CC-01

En la Figura 7 se presenta una gráfica en calendario de las concentraciones de 24 horas de SO₂ de la estación de monitoreo ambiental CA-CC-01, de mayo de 2024 a abril de 2025 (concentraciones promedio de SO₂ de los últimos 12 meses). Las concentraciones de 24 horas de SO₂ excedieron el valor de los ECA para aire referencial de 250 µg/m³ en 4 ocasiones durante febrero a abril del 2025 y en 3 ocasiones durante noviembre y diciembre del 2024.



Fig. 7 Concentraciones de 24 horas de SO₂ de mayo de 2024 a abril de 2025, en la estación CA-CC-01.

En la Figura 8 se presenta una gráfica polar con las concentraciones horarias de SO₂ obtenidas de la estación de monitoreo CA-CC-01, correspondiente a abril de 2025. Se observa que las mayores concentraciones de SO₂ (indicadas en rojo oscuro) han provenido predominantemente del sur sureste (SSE). Por otro lado, en la dirección sureste (SE) con respecto a la estación de monitoreo CA-CC-01, se encuentra ubicada la planta de refinado de zinc del CMLO, y de las emisiones registradas se les atribuye al CMLO como la fuente emisora de SO₂ en el sector de La Oroya Antigua.

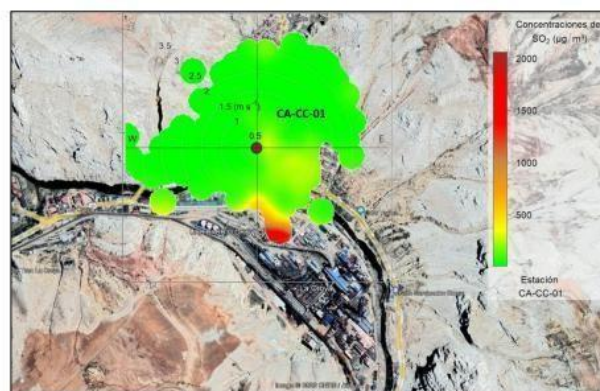


Fig. 8 Gráfica polar de concentración horarias para el SO₂ en la estación a sotaviento (AC-CC-01)

IV. CONCLUSIONES

Las concentraciones de 24 horas de dióxido de azufre (SO_2), obtenidas en abril de 2025, excedieron en una (1) ocasión el valor del ECA para aire referencial de $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Decreto Supremo N.º 003- 2017-MINAM). Por otro lado, se excedió el ECA de aire de dióxido de azufre de $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Decreto Supremo N.º 003-2017-PCM). La máxima concentración de 24 horas de SO_2 fue de $255,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ registrado el 26 de abril de 2025.

- Las concentraciones promedio móvil de 3 horas de SO_2 registradas en abril de 2025 oscilaron de $6,03 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $960,22 \mu\text{g}/\text{m}^3$, las cuales superaron los Niveles de Estados de Alerta Nacionales para Contaminantes del Aire hasta en 17 ocasiones (sólo se superaron los estados de alerta de cuidado). Los estados de alerta fueron aprobados por el Ministerio de Salud mediante Decreto Supremo N.º 009-2003- SA.

- En las concentraciones horarias de SO_2 en abril de 2025, se observó concentraciones de hasta $2183,67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ que se registró el 7 de abril a las 14:00 horas.

- Mediante una representación en calendario de las concentraciones de 24 horas de SO_2 correspondiente a los últimos 12 meses en la estación de monitoreo ambiental CA-CC- 01, se observa que se excedió el valor de los ECA para aire referencial de $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$

en 4 ocasiones durante febrero a abril del 2025.

- Mediante una representación polar de las concentraciones horarias de SO_2 para determinar la procedencia de las concentraciones del dióxido de azufre (SO_2), correspondiente a abril de 2025, se determinó que las concentraciones de SO_2 más altas han provenido mayoritariamente del sur sureste (SSE) con respecto de la estación de monitoreo CA-CC-01. Por otro lado, en la dirección sureste (SE), se encuentra ubicada la planta de refinado de zinc del CMLO, a quien se le atribuye como la fuente emisora de SO_2 .

- Durante el periodo de monitoreo de abril de 2025 en la estación de monitoreo ambiental CA-CC-01, la dirección del viento tuvo una predominancia desde el oeste (W) con una frecuencia mensual de 23,3%, seguido de vientos del oeste suroeste (WSW) con 14,6%.

- El análisis de las concentraciones horarias, los valores medios móviles de tres horas y las concentraciones de 24 horas de dióxido de azufre (SO_2) permitió realizar una evaluación exhaustiva de la calidad del aire en los alrededores del complejo metalúrgico de La Oroya en abril de 2025. Los resultados mostraron que, aunque la mayoría de las concentraciones se mantuvieron por debajo de los estándares de calidad ambiental (SQA), se produjo un único rebasamiento del SQA

de 24 horas ($250 \mu\text{g}/\text{m}^3$), lo que confirma la aparición de episodios críticos de contaminación atmosférica que justifican un seguimiento ambiental continuo.

- Las variables meteorológicas, en particular la dirección y la velocidad del viento, tuvieron una influencia

directa en la propagación y la acumulación de SO_2 . Los vientos predominantes del oeste (O) y del oeste-suroeste (OSO), así como las velocidades moderadas del viento, favorecieron la propagación del contaminante durante la mayor parte del período de evaluación. Sin embargo, en determinados intervalos de tiempo, las condiciones atmosféricas limitaron la propagación, lo que se tradujo en un aumento significativo de las concentraciones de SO_2 .

- Un análisis espacial basado en diagramas polares reveló que las concentraciones horarias más altas de SO_2 procedían principalmente del sector sur-sureste (SSE) en relación con la estación de medición CA-CC-01. Esta dirección coincide con la ubicación de la refinera de zinc en el complejo metalúrgico de La Oroya, lo que confirma la identificación de esta planta como una fuente importante de emisiones de SO_2 durante el período de estudio.

- Los rebasamientos de los valores de alarma y el rebasamiento ocasional del valor ECA de 24 horas subrayan la necesidad de reforzar la gestión ambiental y las medidas de control de emisiones en el complejo metalúrgico de La Oroya. Del mismo modo, los resultados subrayan la importancia de incluir análisis meteorológicos en la interpretación de la calidad del aire, ya que las condiciones atmosféricas desempeñan un papel decisivo en la aparición de episodios críticos de contaminación.

En general, las conclusiones reformuladas muestran que el estudio cumple su objetivo de evaluar el comportamiento del SO_2 y analizar la influencia de las variables meteorológicas, y proporciona información relevante para la toma de decisiones en materia de gestión ambiental

AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad Privada del Norte- Lima-Perú.

REFERENCIAS

- [1] Echeverri C. (2019). Contaminación atmosférica. Ediciones de la U. Colombia.
- [2] Estándares de Calidad del Aire DS N° 003-2017. MINAM
- [3] ISO 900.030 Gestión Ambiental. Método de Referencia para la determinación de material particulado
- [4] ISO 14001: 2015. Sistemas de Gestión Ambiental. Requisitos con orientación para su uso.
- [5] MASTERS G & ELA W. (2008). Introducción a la Ingeniería Medio Ambiental. Editorial Pearson.
- [6] Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire D.S N° 010-2019-MINAM