Análisis temporal del PM_{10} y su relación con variables meteorológicas en el Municipio de Oruro
Temporal analysis of PM10 and its relationship with meteorological variables in the Municipality of Oruro

Ing. Chambi Colque Kevin David[1], M.Sc. Ing. Nina Yucra Omar Rodolfo[2].

Resumen

La contaminación atmosférica por PM10 es una preocupación creciente en áreas urbanas debido a sus efectos adversos en la salud y el medio ambiente, especialmente en ciudades como Oruro, donde existe un vacío de información sobre su dinámica temporal. Este estudio analizó el comportamiento temporal de las concentraciones de PM10 en los cinco distritos del municipio de Oruro y su relación con variables meteorológicas. Se realizaron mediciones interdiarias de PM10 en 24 sitios durante cinco meses utilizando el equipo Microdust Pro, y se obtuvieron datos meteorológicos de la estación local proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología - Oruro. El análisis reveló una marcada variabilidad espacial y temporal en las concentraciones de PM10, con los distritos 3 y 4 presentando los niveles más altos y un claro patrón estacional con picos en la época seca. Se encontraron correlaciones significativas entre los niveles de PM10 y las variables meteorológicas, especialmente precipitación y temperatura. El Índice de Calidad del Aire calculado indicó períodos frecuentes de mala calidad del aire según los estándares de la OMS. Estos hallazgos subrayan la necesidad de implementar medidas de control más estrictas y enfocar los esfuerzos en los meses secos y en los distritos más afectados para mejorar la calidad del aire en Oruro.

Abstract

Small and medium-sized SMEs represent one of the most important axes in the development and economy of the country, through the generation of jobs and the promotion of national production. However, there are few studies that show the current situation and needs that allow establishing actions for their survival and development through continuous improvement. This research work was framed in the structuring of a study of the implementation of continuous improvement methodologies in manufacturing SMEs in the city of Oruro. For this purpose, the actions that led to the development of the investigative work were based on a bibliographic review framed in the current situational context of SMEs and the theme of continuous improvement. Subsequently, a survey was structured to investigate the degree of knowledge and implementation of these. continuous improvement techniques in these organizations for which a Focus Group was executed whose purpose laid the foundations for its approach; finally, the survey developed was applied to a selected sample of small and medium-sized manufacturing companies in the city of Oruro.The research work allows us to conclude that the degree of knowledge and application of continuous improvement methodologies in SMEs is still in the initial development process since they do not have the necessary means of dissemination that encourage information about these techniques and the multiple benefits. aimed at improving productivity and consequently achieving its sustainability and development.

INFORMACIÓN DE ARTICULO:

Palabras clave:
Material particulado, Contaminación atmosférica, Calidad del aire,Variables meteorológicas, Análisis temporal.

Keywords:
Particulate matter, Air pollution, Air quality, Meteorological variables, Temporal analysis.

Citar como:
Chambi A.& Nina O. (2024). Análisis temporal del PM10 y su relación con variables meteorológicas en el Municipio de Oruro

Revista de Ciencia y Tecnología en Ingeniería Industrial, 6(1).

pág – pág

[1]Carrera de Ingeniería Industrial, Facultad Nacional de Ingeniería, Universidad Técnica de Oruro, Bolivia. kevindavidchambi@gmail.com
[2]Carrera de Ingeniería Industrial, Facultad Nacional de Ingeniería, Universidad Técnica de Oruro, Bolivia. omrus2003@yahoo.com

1. Introducción

El estudio de la contaminación atmosférica por material particulado PM_{10} se ha convertido en un tema de creciente preocupación a nivel mundial debido a sus efectos adversos en la salud humana y el medio ambiente (Santillán et al., 2016).

La contaminación del aire representa uno de los mayores desafíos ambientales del siglo XXI, siendo las partículas en suspensión uno de los contaminantes más estudiados por su impacto en la salud pública. El PM_{10}, definido como "un conjunto de partículas sólidas y líquidas emitidas directamente al aire, tales como el hollín de diésel, el polvo de la agricultura, las partículas resultantes de procesos productivos y demás" (Fang et al., 2006), ha sido asociado con diversas enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006), "se le atribuye más de dos millones de muertes prematuras cada año a los efectos de la contaminación atmosférica en espacios abiertos y cerrados urbanos".

Investigaciones previas han demostrado que las concentraciones de PM_{10} varían significativamente en función de factores como la ubicación geográfica, las condiciones meteorológicas y las actividades antropogénicas (Celis et al., 2007). Estudios realizados en ciudades latinoamericanas han revelado patrones estacionales y diarios en las concentraciones de PM_{10}, así como correlaciones con variables meteorológicas como la temperatura, precipitación y velocidad del viento (Palacio et al., 2014).

El municipio de Oruro, ubicado en el altiplano boliviano, presenta características únicas que lo hacen susceptible a problemas de contaminación atmosférica. Su altitud (aproximadamente 3.700 metros sobre el nivel del mar), clima semiárido y actividades económicas, principalmente mineras e industriales, contribuyen a la presencia de material particulado en el aire. Como señalan Kim et al. (2014), "las partículas gruesas PM_{10} tienden a depositarse en la región traqueobronquial", lo que puede tener implicaciones significativas para la salud de la población local.

A pesar de la importancia de comprender la dinámica del PM_{10} en Oruro, existía un vacío de información respecto a la variabilidad temporal de este contaminante y su relación con factores meteorológicos en los diferentes distritos del municipio.

El objetivo principal de este estudio fue analizar el comportamiento temporal de las concentraciones de PM_{10} en los cinco distritos del municipio de Oruro durante el período de enero a mayo, y examinar su relación con variables meteorológicas como velocidad del viento, precipitación y temperatura.

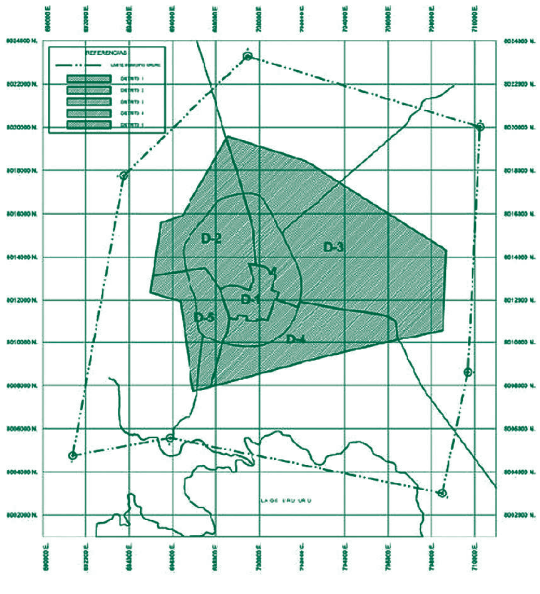
2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

El estudio se realizó en el municipio de Oruro, Bolivia (17°58'S, 67°07'W), ubicado a una altitud de 3735 m sobre el nivel del mar. El municipio se divide en 5 distritos urbanos, cada uno con características diferentes en términos de densidad poblacional, actividades económicas y fuentes de emisión de contaminantes. Se considero el área urbana intensiva (figura 1), definida como la porción de territorio que concentra la mayor consolidación física de la red vial, manzanas, predios y densidad en edificaciones, actividades y servicios del área urbana. Esta área abarca una extensión de 10358 hectáreas (Plan de desarrollo municipal del Municipio de Oruro, 2018).

El municipio de Oruro presenta un clima semiárido frío, con temperaturas medias anuales de 9°C y precipitación pluviales promedio de 83 mm concentrada en los meses de diciembre a marzo (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, 2021).

Figura 1: *Distritación del municipio de Oruro en la porción del área intensiva*



Fuente: *Elaboración propia.*

2.2 Periodo de estudio

El presente estudio se realizó durante un período de cinco meses, desde enero hasta mayo, abarcando la transición de la época húmeda a la época seca en la región.

2.3. Medición de PM_{10}

Se utilizó el equipo Microdust Pro para medir las concentraciones de PM_{10} en 24 sitios de monitoreo distribuidos estratégicamente en los 5 distritos siguiendo los lineamientos del método de mediciones simplificadas estipulado en el manual técnico "diseño, implementación y operación de redes de monitoreo de calidad del aire para ciudades de Bolivia" (2016).

Las mediciones se realizaron interdiariamente durante el periodo de estudio. El equipo fue calibrado según las especificaciones del fabricante antes de cada sesión de monitoreo. En cada distrito se seleccionaron entre 4 y 6 sitios de monitoreo, considerando la representatividad espacial y priorizando zonas de alto tránsito vehicular, industriales, comerciales y lugares de alta concurrencia ciudadana (figura 2).

Los datos obtenidos se registraron y organizaron para su posterior análisis.

2.4. Análisis temporal

Para evaluar la variabilidad temporal de las concentraciones de PM_{10}, se calcularon promedios mensuales para cada distrito del municipio de Oruro. Estos promedios se representaron gráficamente mediante diagramas de barras, permitiendo visualizar las fluctuaciones en los niveles de PM_{10} a lo largo del periodo de estudio.

Además, se llevó a cabo un análisis de la distribución de frecuencias relativa porcentual de las concentraciones de PM_{10} en cada distrito. Este análisis facilitó la identificación de patrones y tendencias en la variabilidad de las concentraciones de PM_{10}.

2.5. Índice de Calidad del Aire (ICA)

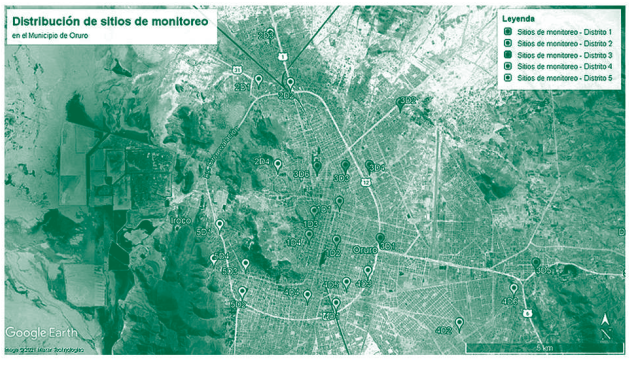
El Índice de Calidad del Aire (ICA) se calculó conforme a la Norma Boliviana NB-62018:2008 del Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA). Para ello, se utilizaron los límites máximos permitidos establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 50 $\mu g/m^3$ y la Ley 1333 a través de su Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica (RMCA) con 150 $\mu g/m^3$. Se categorizó la calidad del aire en cinco niveles: Buena, Regular, Mala, Muy Mala y Peligrosa.

2.6. Análisis meteorológicos

Los datos meteorológicos de velocidad del viento, precipitación y temperatura se obtuvieron de la estación meteorológica "Cabaña Forestal" (código 04001, coordenadas 17°58'29"S y 67°4'49"W), proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) de Oruro.

Se calcularon promedios diarios para cada variable y se utilizó el software WRPLOT VIEW 8.0.2 para generar rosas de vientos y analizar la dirección y velocidad predominantes. Los datos de dirección y velocidad del viento se procesaron y adecuaron al formato requerido por el software.

Figura 2: *Distribución de sitios de monitoreo en el municipio de Oruro*



Fuente: *Elaboración propia.*

2.7. Análisis estadístico

Se evaluó la normalidad de los datos mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Se utilizo el coeficiente de correlación de Pearson para evaluar la relación entre las concentraciones de PM_{10} y las variables meteorológicas (velocidad del viento, precipitación y temperatura).

Se utilizó un nivel de significancia de 0.05 y 0.01 para determinar la significancia estadística de las correlaciones, para este propósito se utilizó el software IBM SPSS Statistics 26.

3. Resultados

3.1. Tendencias mensuales y estacionales de PM_{10}

El análisis mensual reveló una clara tendencia de aumento en las concentraciones de PM_{10} a lo largo del período de estudio en todos los distritos. Se identificó un patrón estacional consistente:

– Enero y febrero presentaron las concentraciones más bajas, coincidiendo con la época húmeda.

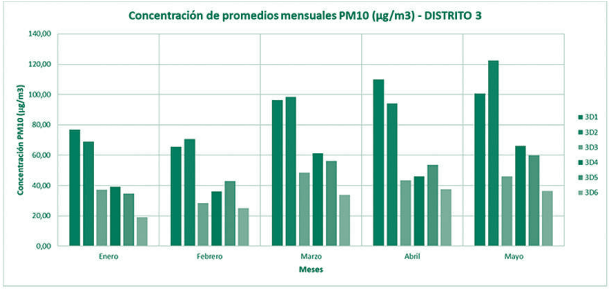
– Marzo mostró un incremento moderado en los niveles de PM_{10}.

– Abril y mayo exhibieron consistentemente las concentraciones más altas, correspondiendo a la época seca.

Esta tendencia fue particularmente pronunciada en los Distritos 3 y 4, donde las concentraciones en abril y

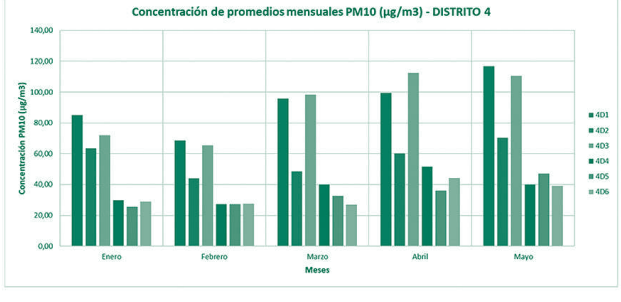
mayo frecuentemente superaron los niveles observados en enero y febrero (figura 3 y 4).

Figura 3: *Concentración promedio mensual de PM10 en el distrito 3*



Fuente: *Elaboración propia.*

Figura 4*: Concentración promedio mensual de PM_{10} en el distrito 4*



Fuente: *Elaboración propia.*

3.2. Distribución de frecuencia de las concentraciones de PM_{10}

El análisis de la distribución de frecuencia de las concentraciones de PM_{10} proporcionó información valiosa sobre la calidad del aire en el municipio de Oruro:

Distrito 1: El 35.6% de las mediciones se encontraron en el rango de 10-30 µg/m^3, otro 35.6% entre 30-50 µg/m^3, y un 26.9% superó el límite de 50 µg/m^3 establecido por la OMS.

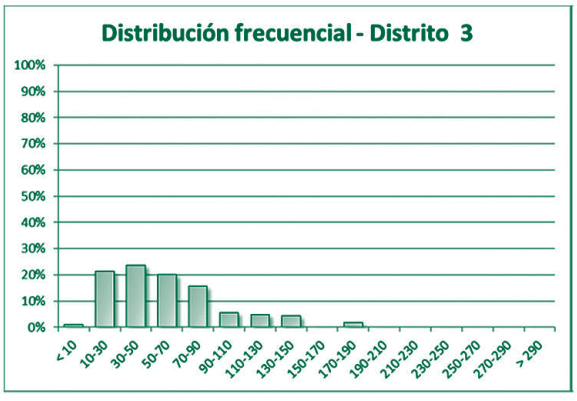
Distrito 2: El 40.7% de las mediciones excedieron el límite de la OMS, con un 18.1% en el rango de 50-70 µg/m3 y un 22.6% por encima de 70 µg/m^3.

Distrito 3: Presentó el mayor porcentaje de excedencias, con un 53.8% de las mediciones por encima del límite de la OMS y un 2.9% supera los límites establecidos por la Ley 1333 (figura 5).

Distrito 4: El 49.3% de las mediciones superaron el límite de 50 µg/m^3.

Distrito 5: El 48% de las mediciones excedieron el límite de la OMS, con un 25% en el rango de 50-70 µg/m^3.

Figura 5*: Distribución de frecuencia relativa porcentual de la concentración de PM10 en el distrito 3*



Fuente: *Elaboración propia.*

3.3. Índice de Calidad del Aire (ICA)

El análisis del ICA reveló diferencias significativas según los estándares aplicados:

Basado en la Ley 1333: La mayoría de los días presentaron una calidad del aire "Buena" o "Regular" en todos los distritos. En el Distrito 1, por ejemplo, los valores del índice de la calidad del aire (ICA) oscilaron entre 10.6 y 46.8, indicando una calidad del aire "Buena" (figura 6).

Basado en los estándares de la OMS: Se observó un deterioro notable en la calidad del aire. En el Distrito 2, por ejemplo, los valores del ICA llegaron a superar valores de 150 en abril y mayo, clasificando la calidad del aire como "Mala" o "Muy Mala" (figura 7).

Según la Ley 1333, la mayoría de los días (85.7%) presentaron una calidad del aire "Buena" o "Regular". Sin embargo, al utilizar los límites más estrictos de la OMS, el 41.3% de los días se clasificaron como "Malos" o "Muy Malos", especialmente en los distritos 3 y 4.

Tendencias similares se observaron en los otros distritos, especialmente en los meses de abril y mayo.

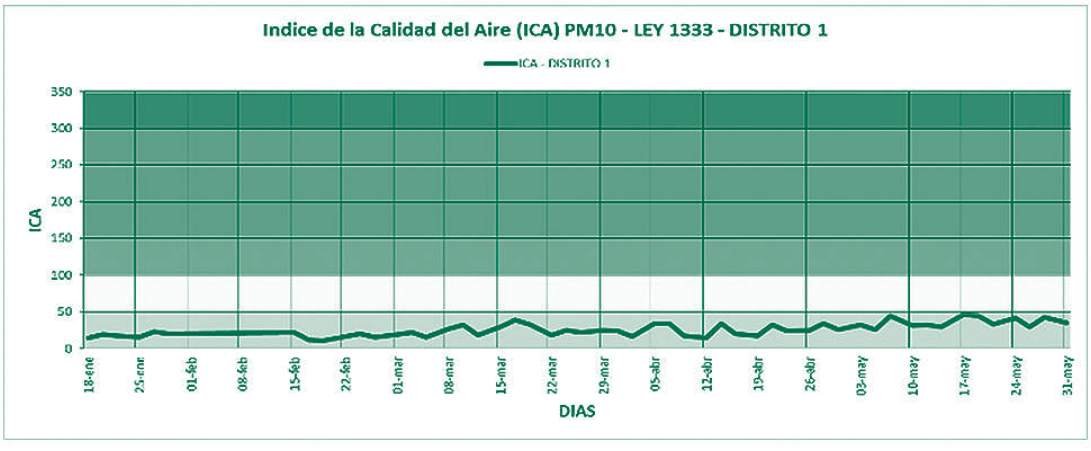
3.4. Relación con variables meteorológicas

Se encontraron correlaciones significativas entre las concentraciones de PM_{10} y las variables meteorológicas:

Velocidad del viento: Se observaron correlaciones negativas débiles a moderadas en la mayoría de los distritos, con coeficientes de correlación de Pearson entre -0.090 y -0.370. La relación más fuerte se observó en los Distritos 1 y 5 ($r = -0.370$, $p < 0.01$).

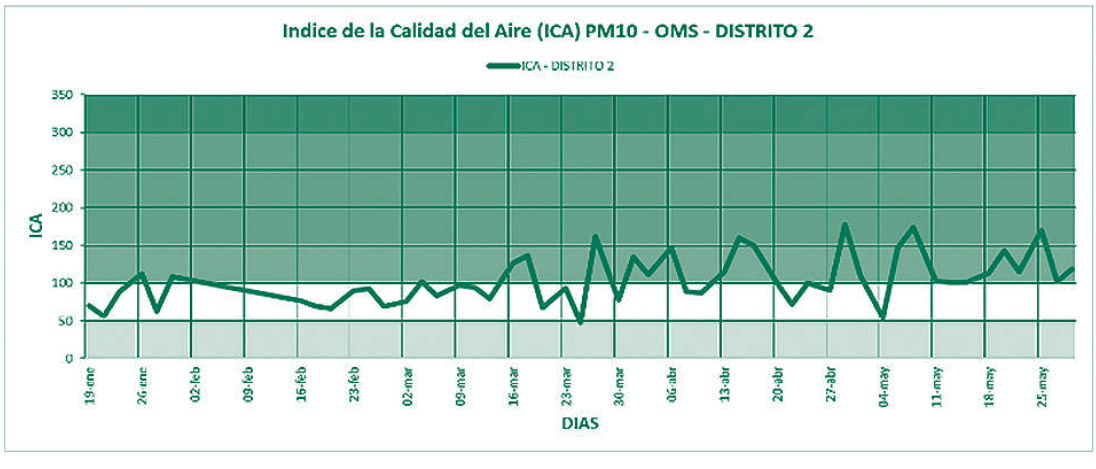
Precipitación: Se hallaron correlaciones negativas en todos los distritos, con coeficientes de correlación entre -0.354 y -0.518 ($p < 0.01$). La relación más fuerte se observó en el Distrito 5 ($r = -0.518$).

Figura 6: *Índice de la calidad del aire para el distrito 1 en función de los límites permisibles de la Ley 1333*



Fuente: *Elaboración propia.*

Figura 7: *Índice de la calidad del aire para el distrito 2 en función de los límites permisibles de la OMS*



Fuente: *Elaboración propia.*

Temperatura: Se observaron correlaciones negativas moderadas a altas en todos los distritos, con coeficientes de correlación que variaron de -0.316 a -0.649 ($p < 0.05$). La relación más fuerte se observó en el Distrito 4 ($r = -0.649$, $p < 0.01$).

Estas correlaciones indican una clara influencia de las condiciones meteorológicas en las concentraciones de PM_{10}, con menores niveles durante períodos lluviosos y cálidos, y mayores concentraciones en condiciones secas y frías.

Análisis de rosa de vientos: El análisis de la rosa de vientos reveló que los vientos predominantes provenían del noroeste (NW), con velocidades que oscilaban principalmente entre 3.6 y 5.7 m/s (54.2% de las observaciones). La figura 8 muestra la rosa de vientos para el período de estudio. Se observó una relación entre la dirección del viento predominante y las concentraciones más altas de PM_{10} en los distritos 3 y 4, ubicados en el sector sureste de la ciudad, sugiriendo un posible transporte de contaminantes desde fuentes ubicadas al noroeste. (figura 9)

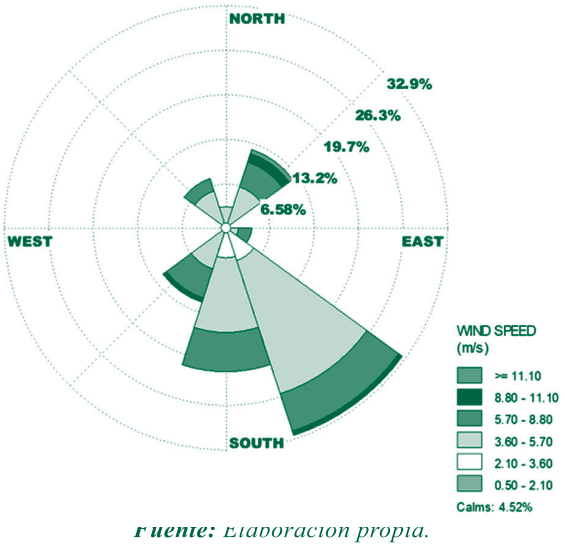
4. Discusiones

Los resultados obtenidos muestran una variabilidad significativa en las concentraciones de PM_{10} entre los diferentes distritos del municipio de Oruro, así como fluctuaciones temporales importantes a lo largo del período de estudio.

Figura 8: *Rosa de vientos del periodo de estudio en Google Earth*

Fuente: *Elaboración propia.*

Figura 9: *Dirección y velocidades hacia donde se dirige el viento en el periodo de estudio*



Fuente: *Elaboración propia.*

En cuanto a la distribución espacial, los distritos 3 y 4 presentaron consistentemente las concentraciones más elevadas de PM_{10}, superando con frecuencia los límites establecidos por la OMS y la legislación boliviana (Ley 1333). Esto podría atribuirse a la mayor actividad industrial y densidad de tráfico en estas zonas, aunque se requieren estudios adicionales para confirmar las fuentes específicas de emisión.

El análisis temporal reveló un patrón estacional claro, con concentraciones más bajas durante los meses de enero a marzo (época húmeda) y niveles más altos en abril y mayo (época seca). Este comportamiento es consistente con lo reportado en otros estudios sobre calidad del aire en zonas urbanas de altura (Cereceda-Balic et al., 2012), y puede explicarse por la reducción del lavado atmosférico y el aumento de la resuspensión de polvo durante la temporada seca.

La evaluación de la influencia de las variables meteorológicas mostró correlaciones significativas, especialmente con la precipitación y la temperatura. La correlación negativa moderada a alta observada entre la concentración de PM_{10} y estas variables en la mayoría de los distritos sugiere que los factores climáticos juegan un papel importante en la dinámica de este contaminante en el municipio de Oruro. Estos hallazgos concuerdan con estudios previos que han documentado la influencia de la meteorología en los niveles de material particulado en ambientes urbanos (Csavina et al., 2014; Talbi et al., 2018). La lluvia puede reducir las concentraciones de PM_{10} mediante el lavado atmosférico, mientras que las temperaturas más bajas pueden favorecer la formación de inversiones térmicas que atrapan los contaminantes cerca del suelo.

Sin embargo, la relación con la velocidad del viento resultó menos consistente entre los distritos, lo que podría indicar la influencia de factores locales como la topografía o la distribución de fuentes de emisión. El análisis de la rosa de los vientos sugiere que la dirección predominante del noroeste podría estar transportando contaminantes hacia los distritos del sureste, contribuyendo a las concentraciones más altas observadas en esas áreas.

El Índice de Calidad del Aire (ICA) calculado reveló que, si bien según los estándares de la Ley 1333 la calidad del aire en Oruro se clasifica generalmente como "Buena" o "Regular", al utilizar los límites más estrictos de la OMS, se observan períodos frecuentes de calidad del aire "Mala" o "Muy Mala", especialmente en los distritos más afectados. Esto subraya la importancia de considerar estándares internacionales más rigurosos en la gestión de la calidad del aire urbano.

5. Conclusiones

Las concentraciones de PM_{10} en el municipio de Oruro presentan una marcada variabilidad espacial y temporal, con los distritos 3 y 4 mostrando los niveles más elevados y un claro patrón estacional con picos durante la época seca.

Los factores meteorológicos, particularmente la precipitación y la temperatura, tienen una influencia significativa en las concentraciones de PM_{10}, con correlaciones negativas moderadas a altas en la mayoría de los distritos.

La dirección predominante del viento del noroeste parece contribuir al transporte de contaminantes hacia los distritos del sureste, aunque se requieren estudios adicionales para confirmar esta hipótesis.

El Índice de Calidad del Aire basado en los estándares de la OMS revela períodos frecuentes de mala calidad del aire, especialmente en los distritos más afectados, lo que sugiere la necesidad de medidas de control más estrictas.

Este estudio proporciona una visión detallada del comportamiento temporal de las concentraciones de PM_{10}

en Oruro y su relación con variables meteorológicas. Los resultados subrayan la necesidad de enfocar los esfuerzos de control de la contaminación durante los meses secos y en los distritos más afectados. Se recomienda realizar estudios adicionales para identificar las fuentes específicas de emisión de PM_{10} en cada distrito y evaluar el impacto de las medidas de control implementadas.

6. Referencias

Celis, J., Morales, J., Zaror, C., & Carvacho, O. (2007). Contaminación del aire atmosférico por material particulado en una ciudad intermedia: El caso de Chillán (Chile). Información Tecnológica, 18(3), 49-58.

Cereceda-Balic, F., Palomo-Marín, M. R., Bernalte, E., Vidal, V., Christie, J., Fadic, X., ... & Gil, E. P. (2012). Impact of Santiago de Chile urban atmospheric pollution on anthropogenic trace elements enrichment in snow precipitation at Cerro Colorado, Central Andes. Atmospheric environment, 47, 51-57.

Csavina, J., Field, J., Félix, O., Corral-Avitia, A. Y., Sáez, A. E., & Betterton, E. A. (2014). Effect of wind speed and relative humidity on atmospheric dust concentrations in semi-arid climates. Science of the Total Environment, 487, 82-90.

Decreto Supremo N° 24176. (8 de diciembre de 1995). Reglamento en materia de contaminación atmosférica. La Paz, Bolivia.

Fang, G. C., Wu, Y. S., Chang, S. Y., Rau, J. Y., Huang, S. H., & Lin, C. K. (2006). Characteristic study of ionic species in nano, ultrafine, fine and coarse particle size mode at a traffic sampling site. Toxicology and industrial health, 22(1), 27-37.

Gobierno Autónomo Departamental de Oruro (s.f.). Plan Territorial de Desarrollo Integral de Oruro 2016-2020.

Gobierno Autónomo Municipal de Oruro (2014). Plan de Desarrollo Municipal 2013-2018: Oruro, hacia el 2018.

Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA) (2008a). NB 62011, Calidad del aire - Contaminantes criterio exterior - Límites máximos permisibles.

Instituto Boliviano de Normalización y Calidad (IBNORCA) (2008b). NB 62018, Calidad del aire - Índice de la contaminación atmosférica diario.

Kim K. H., Kabir E., & Kabir S. (2014). A review on the human health impact of airborne particulate matter. Environment international, 74, 136-143.

Organización Mundial de la Salud (OMS) (2006). Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre: Actualización mundial 2005 (No. WHO/SDE/PHE/OEH/06.02). Ginebra: Suiza.

Organización Mundial de la Salud (OMS) (2021). Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire: partículas en suspensión (PM2.5 y PM10), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono.

Palacio, D., Zafra, C., & Rodríguez, J. P. (2014). Evaluación de la calidad del aire mediante un laboratorio móvil: Puente Aranda (Bogotá, Colombia), Revista Facultad Ingeniería Universidad Antioquía, (2), 153-166.

Red de Monitoreo de la Calidad del Aire (Red MoniCA) (2016). Manual Técnico de Diseño, Implementación y Operación de Redes de Monitoreo de Calidad del Aire para Ciudades de Bolivia. Segunda Edición. Editorial Proyecto Aire Limpio. La Paz, Bolivia.

Red de Monitoreo De La Calidad Del Aire (Red MoniCA) (2018). Informe anual calidad del aire: Municipio De Oruro - Gestión 2018.

Reglamento en Materia de Contaminación Atmosférica. (8 de diciembre de 1995). La Paz, Bolivia.

Santillán, G., Damián, D., Rodríguez, M., Torres, S., Cargua, F., & Torres, S. (2016). Estimación del grado de contaminación de material particulado atmosférico y sedimentable en el laboratorio de servicios ambientales de la UNACH.

Talbi, A., Kerchich, Y., Kerbachi, R., & Boughedaoui, M. (2018). Assessment of annual air pollution levels with PM1, PM2. 5, PM10 and associated heavy metals in Algiers, Algeria. Environmental Pollution, 232, 252-263.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) (2008). Manual práctico de terminología meteorológica e hidrológica para la difusión masiva del dato y su uso en la gestión de riesgo. La Paz, Bolivia.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) (2021). Reporte nacional: informe meteorológico – Municipio de Oruro.