

Modelación de la dispersión de material particulado PM2.5 en la zona urbana del municipio de Sucre utilizando imágenes satelitales Sentinel-2A.

Modeling the dispersion of PM2.5 particulate matter in the urban area of the municipality of Sucre using Sentinel-2A satellite imagery.

ORTEGA- Marco¹

¹Universidad Mayor Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca, Carrera de Ingeniería Ambiental.

Recibido marzo, 2025; Aceptado mayo, 16, 2025

Resumen

El aumento del parque automotor y de las actividades urbanas en la ciudad de Sucre ha incrementado las emisiones de material particulado (PM2.5), lo que afecta a la calidad del aire y a la salud pública. El presente estudio propone y valida una metodología para estimar la distribución espacial del PM2.5 en el área urbana de Sucre entre 2023 y 2024, a partir de imágenes Sentinel-2A (con un máximo del 10 % de nubosidad) corregidas atmosféricamente mediante FLAASH y datos in situ de la Red MoniCA. Para desarrollar modelos de regresión lineal múltiple, se utilizaron reflectancias de las bandas B2, B4, B8 y B12, emparejadas con promedios horarios de estaciones automáticas. El modelo seleccionado presentó un buen rendimiento estadístico ($R^2 = 0,92$; $RMSE = 4,10$) y se validó con estaciones de referencia. La cartografía generada puso de manifiesto niveles de riesgo medio en sectores de los distritos 1 y 2, principalmente asociados a la congestión del tráfico y a las condiciones meteorológicas de la temporada de lluvias. La metodología implementada en ENVI 5.3 y RStudio constituye una herramienta útil y reproducible para la gestión medioambiental urbana.

Palabras Clave Regresión lineal múltiple; teledetección; calidad del aire.

Abstract

The growth of the vehicle fleet and urban activities in the city of Sucre has led to an increase in particulate matter (PM2.5) emissions, which affects air quality and public health. This study proposes and validates a methodology for estimating the spatial distribution of PM2.5 in the urban area of Sucre between 2023 and 2024, based on Sentinel-2A images (with a maximum of 10% cloud cover) atmospherically corrected using FLAASH and in situ data from the MoniCA Network. To develop multiple linear regression models, reflectance values from bands B2, B4, B8, and B12 were used, paired with hourly averages from automatic monitoring stations. The selected model demonstrated good statistical performance ($R^2 = 0,92$; $RMSE = 4,10$) and was validated using reference stations. The generated maps revealed moderate risk levels in parts of Districts 1 and 2, primarily associated with traffic congestion and weather conditions during the rainy season. The methodology implemented in ENVI 5.3 and RStudio constitutes a useful and reproducible tool for urban environmental management.

Keywords

Multiple linear regression; remote sensing; air quality.

Citación: Ortega M. (2025). Modelación de la dispersión de material particulado PM2.5 en la zona urbana del municipio de Sucre utilizando imágenes satelitales Sentinel-2A. *Revista Ingeniería Sostenible Ambiental*, 2(5), 149-156

Introducción

La contaminación atmosférica representa uno de los principales problemas ambientales y de salud pública a escala global, especialmente en áreas urbanas donde el crecimiento demográfico, el incremento del parque automotor y las actividades antrópicas intensifican las emisiones contaminantes.(Mozafari et al.,2019). Entre los contaminantes más perjudiciales se encuentra el material particulado fino (PM_{2.5}), cuyas partículas, con diámetros aerodinámicos menores a 2,5 µm, pueden penetrar profundamente en el sistema respiratorio, alcanzando los alvéolos pulmonares y generando enfermedades respiratorias, cardiovasculares y un aumento en la mortalidad prematura (Castro et al., 2010.).

La Organización Mundial de la Salud actualizó en 2021 sus Guías de Calidad del Aire, recomendando un límite promedio anual de 5 µg/m³ y un valor diario de 15 µg/m³ para PM_{2.5}, con el fin de reducir los riesgos para la salud humana (WHO, 2021). Sin embargo, en muchos países en desarrollo, el monitoreo continuo de este contaminante se ve limitado por la baja densidad de estaciones terrestres, la discontinuidad de los registros y los altos costos operativos, lo que dificulta la evaluación espacial y temporal de la calidad del aire (C. Guo et al., 2018).

Recientemente, el uso del sensor Sentinel-2 ha cobrado relevancia en estudios urbanos debido a su alta resolución espacial (10-20 m), que permite capturar la heterogeneidad de las emisiones contaminantes en entornos urbanos con mayor detalle que los sensores de resolución media, como MODIS o Landsat (Drusch et al., 2012).

Investigaciones previas han demostrado que determinadas bandas espectrales de Sentinel-2 pueden utilizarse eficazmente para estimar aerosoles y material particulado, alcanzando altos niveles de ajuste estadístico cuando se integran con datos de monitorización en superficie (Jiang et al., 2023).

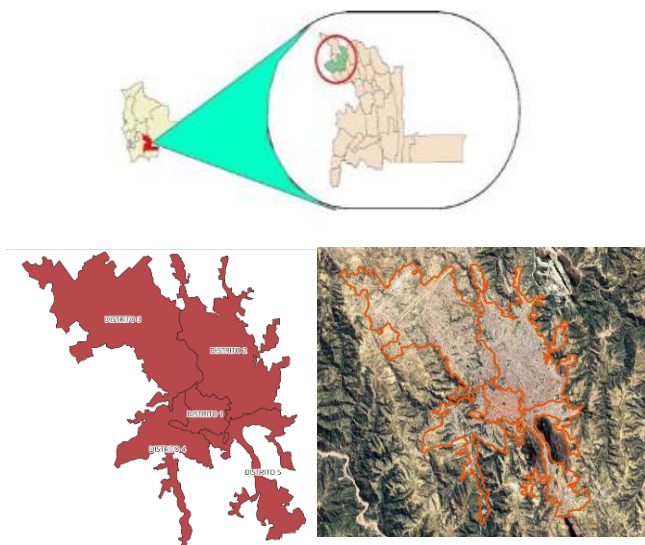
En el municipio de Sucre (Bolivia), los estudios sobre contaminación atmosférica mediante teledetección son limitados y se han centrado principalmente en estimar el PM₁₀ con imágenes Landsat, mostrando correlaciones significativas entre reflectancias espectrales y concentraciones medidas in situ (Gómez, 2024). Sin embargo, hay un vacío de información sobre la modelización espacial del PM_{2.5} a escala urbana que utilice imágenes Sentinel-2 de alta resolución, lo que limita la identificación de zonas de riesgo y la formulación de estrategias de gestión ambiental locales(Y. Guo et al., 2014).Ante esta problemática, el objetivo de este estudio es modelar la dispersión del material particulado (PM_{2.5}) en la zona urbana del municipio de Sucre entre 2023 y 2024 mediante el procesamiento de imágenes satelitales Sentinel-2A e integrarlas con los datos de las estaciones automáticas de la Red MoniCA. Para ello, se desarrollaron modelos de regresión lineal múltiple basados en reflectancias espectrales que permitieron estimar y cartografiar la distribución espacial del contaminante. Los resultados obtenidos suponen una aportación metodológica importante para el seguimiento de la calidad del aire en ciudades intermedias y ofrecen información técnica que puede ayudar a la hora de tomar decisiones en materia de gestión ambiental y protección de la salud pública.

Materiales y métodos

Área de estudio

Sucre (S19°3'2" y O65°47'25") se encuentra localizado en la provincia Oropeza del departamento de Chuquisaca a una altura de 2750m.s.n.m. El área total es de 1.721,69km² que son distribuidas en 8 distritos de las cuales 5 son distritos urbanos, 3 son distritos rurales. Este municipio es el más poblado del departamento de Chuquisaca, representando un 45% de la población total. Limita al norte con Poroma, al sur con Yotala, al este con Tarabuco y al sudeste con Yamparaez. El clima predominante es templado subhúmedo, con una temperatura mínima media anual de 15°C y una máxima media de 22°C. En la ilustración adjunta se puede observar la ubicación del municipio de Sucre en la provincia Oropeza del departamento de Chuquisaca.

Figura 1 Ubicación geográfica de los 5 distritos urbanos de la Sucre con datos vectoriales de la secretaria de ordenamiento territorial del G. A. M. S. e imagen satelital de Google Earth Pro.



Mediciones de PM2.5 in situ

Las concentraciones de PM2.5 empleadas en la calibración y validación del modelo provienen de mediciones in situ realizadas por las estaciones automáticas de la Red MoniCA en la ciudad de Sucre durante el periodo 2023–2024. Se utilizaron registros diarios de las estaciones ubicadas en la avenida Marcelo Quiroga Santa Cruz, Yurac Yurac y la Terminal de Buses, los cuales fueron promediados temporalmente y sincronizados con las fechas de adquisición de las imágenes Sentinel-2A.

Imágenes sentinel 2A

El presente estudio se inició con la recopilación de imágenes satelitales Sentinel-2A correspondientes al periodo 2023-2024, con un máximo del 10 % de nubosidad sobre el área de estudio.

En total, se descargaron doce imágenes de la plataforma Copernicus Data Space Ecosystem y se utilizaron las bandas espectrales B2, B4, B8 y B12 para analizar y modelar la concentración de PM2.5.

Tabla 1. Características espectrales y espaciales de las bandas Sentinel 2A

Bandas	Longitud De Onda (μm)	Resolución (m)
Banda 1 - Aerosol	0,43 - 0,45	60
Banda 2 - Blue	0,45 - 0,52	10
Banda 3 - Green	0,54 - 0,57	10
Banda 4 - Red	0,65 - 0,68	10
Banda 5 - Red edge 1	0,69 - 0,71	20
Banda 6 - Red edge 2	0,73 - 0,74	20
Banda 7 - Red edge 3	0,77 - 0,79	20
Banda 8 - Near Infrared (NIR) 1	0,78 - 0,90	10
Banda 8A - Near Infrared (NIR) 2	0,85 - 0,87	20
Banda 9 - Water vapour	0,93 - 0,95	60
Banda 10 - Cirrus	1,36 - 1,39	60
Banda 12 - SWIR 2	2,10 - 2,28	20

Metodología para la estimación de PM2.5

Selección de imágenes satelitales: Se seleccionaron imágenes del satélite Sentinel-2A correspondientes al periodo 2023-2024, con un máximo del 10 % de nubosidad sobre el área de estudio. Dichas imágenes se descargaron de la plataforma Copernicus Data Space Ecosystem, teniendo en cuenta su adecuada resolución espacial (10-20 m) y temporal para el análisis urbano.

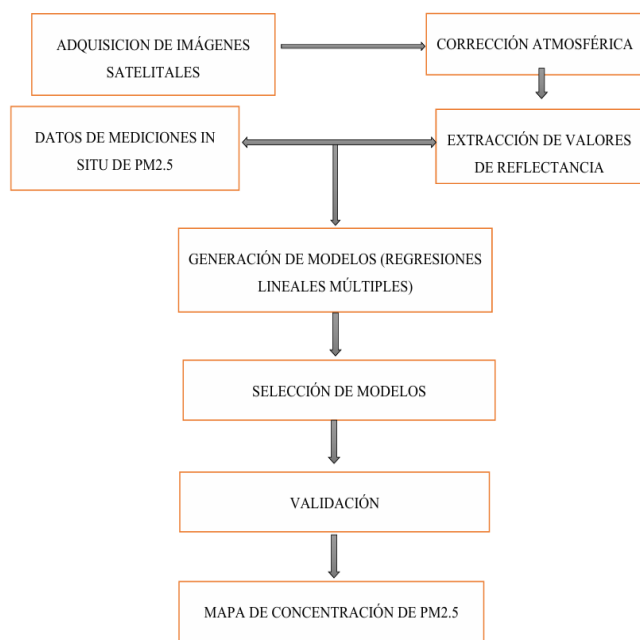
Preprocesamiento de las imágenes: El preprocesamiento consistió en corregir la atmósfera de las imágenes mediante el algoritmo FLAASH, implementado en el programa informático ENVI 5.3, con el objetivo de convertir los valores de radiancia en reflectancia de superficie y reducir los efectos atmosféricos.

Construcción de matrices de datos: Se crearon matrices integrando los valores de reflectancia de las bandas B2, B4, B8 y B12 con las concentraciones de PM_{2.5} obtenidas in situ por las estaciones automáticas de la Red MoniCA. Estas matrices fueron procesadas en el programa estadístico RStudio con el fin de desarrollar modelos de regresión lineal múltiple y obtener ecuaciones empíricas para la estimación de PM_{2.5}.

Validación de los resultados: Los modelos generados se evaluaron mediante indicadores estadísticos como el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (RMSE) y el criterio de información de Akaike (AIC). Además, se compararon los valores estimados por el modelo con las mediciones in situ para determinar la precisión y fiabilidad de la estimación.

Generación de mapas y análisis espacial: Por último, se aplicó el modelo seleccionado para generar mapas temáticos de la concentración de PM_{2.5} y analizar los patrones espaciales y temporales de su distribución en la zona urbana del municipio de Sucre.

Figura 2 Esquema Metodológico para la estimación del PM_{2.5}



Resultados

En el desarrollo de esta investigación se emplearon modelos derivados de la extracción de valores de reflectancia correspondientes a distintas bandas espectrales. Estos valores fueron organizados en una matriz de datos mediante Microsoft Excel y posteriormente exportados al entorno estadístico RStudio. En RStudio se aplicaron análisis basados en modelos de regresión lineal múltiple, con el propósito de identificar relaciones estadísticamente significativas entre las variables. Los modelos seleccionados, definidos por su mayor nivel de significancia, fueron procesados en el software ENVI 5.3, generando un mapa temático que representa tanto los niveles de concentración como los niveles de riesgo asociados a la exposición a partículas PM_{2.5}.

A partir de la matriz de datos correspondiente al período 2023-2024, se generaron doce modelos de regresión lineal múltiple con diferentes combinaciones de bandas espectrales de las imágenes Sentinel-2A. Estos modelos se evaluaron mediante el coeficiente de determinación (R^2), el error cuadrático medio (RMSE) y el criterio de información de Akaike (AIC). Este último es un indicador clave para seleccionar el modelo óptimo, ya que este criterio permite comparar modelos de distinta estructura, identificando aquel que describe de forma más adecuada la relación entre las bandas espectrales Sentinel-2A y las concentraciones de PM_{2.5} observadas.

Tabla 2 Modelos de regresión lineal múltiple generados en el software Rstudio con sus indicadores

Mod	R^2	RMSE	AIC	fecha
3	0.92	4.10	71.54233333	08/08/2023
9	0,8556	5,074	14.79155172	10/02/2024

Como se muestra en la tabla 2, se identificaron dos modelos con un mejor rendimiento estadístico, correspondientes a las fechas 8 de agosto de 2023

(modelo 3) y 10 de febrero de 2024 (modelo 9). El modelo 3 presentó el mejor ajuste global, con un R² de 0,92, un RMSE de 4,10 µg/m³ y un AIC de 71,54, lo que evidencia una alta capacidad predictiva y un menor error de estimación en comparación con los demás modelos generados.

Por tanto, el modelo 3 fue seleccionado para la espacialización de las concentraciones de PM2.5 en el área urbana del municipio de Sucre. Esta selección se fundamentó en la mayor concordancia observada entre los valores estimados por el modelo y las concentraciones registradas por las estaciones automáticas de la Red MoniCA, ubicadas en zonas de alto tráfico vehicular, particularmente en la Terminal de Autobuses y en la avenida Marcelo Quiroga Santa Cruz. El modelo seleccionado se expresa mediante la siguiente ecuación

$$PM2.5 = 0.054 * B2 - 0.039 * B4 + 0.041 * B8 + 0.022 * B12 + 11.36$$

Tabla 3 Comparación de valores estimados vs. valores de monitoreo de PM2.5 para la temporada seca y húmeda

Enero 2024				
Ubicación	PM2.5 Estimado (Modelo) (µg/m ³)	PM2.5 (Red MoniCA) (µg/m ³)	Error de validación	Error de validación promedio (%)
Av. Marcelo Quiroga Santa Cruz	21.56	17.87	3.69	
Agosto 2023				
Ubicación	PM2.5 Estimado (Modelo) (µg/m ³)	PM2.5 (Red MoniCA) (µg/m ³)	Error de validación	Error de validación promedio (%)
Av. Marcelo Quiroga Santa Cruz	38.75	31.54	7.21	
Yurac Yurac	44.12	18.74	25.38	19.33
Terminal de autobuses	46.13	30.72	15.41	

Figura 3 Distribución espacial de los niveles de PM2.5 agosto 2023

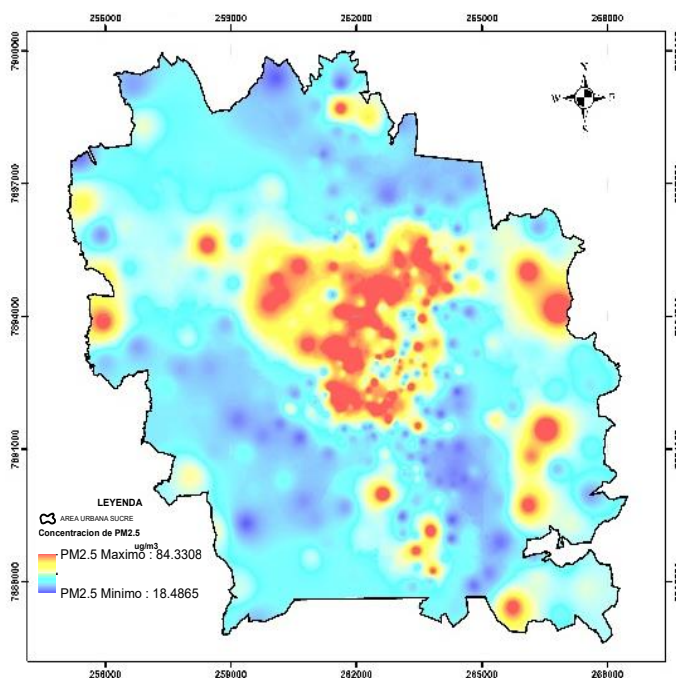
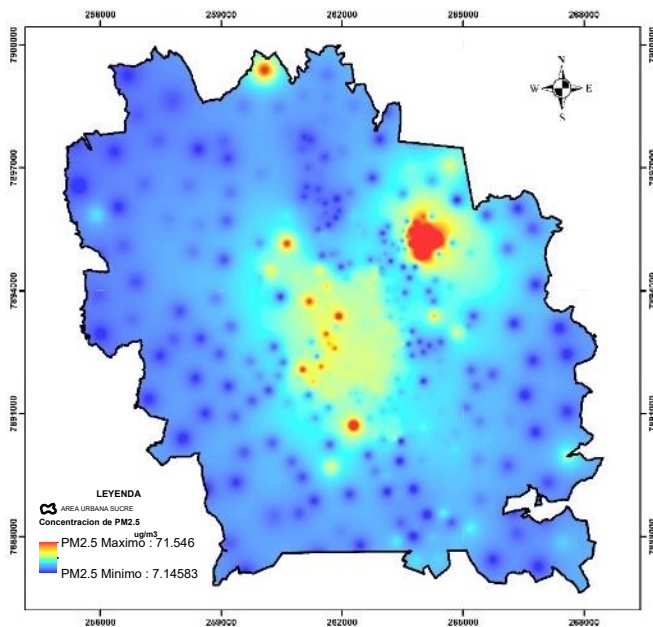


Figura 4 Distribución espacial de los niveles de PM2.5 enero 2024



Discusión

En este estudio, se analizó la distribución espacial de las concentraciones de material particulado (PM2.5) en el área urbana del municipio de Sucre entre 2023 y 2024 a partir de la integración de imágenes satelitales Sentinel-2A y datos de monitorización in situ. Este enfoque permitió evaluar la capacidad de los modelos de regresión lineal múltiple para representar la variabilidad espacial del PM2.5 en un contexto urbano con una cobertura limitada de estaciones de monitoreo.

Una de las principales contribuciones del estudio es la comparación entre los valores estimados por el modelo y las concentraciones registradas por la red MoniCA. El modelo seleccionado presentó un alto coeficiente de determinación ($R^2 = 0,92$) y un bajo error de estimación, lo que evidencia una buena correspondencia entre los datos modelados y las mediciones reales. Estos resultados son coherentes con investigaciones previas que destacan la utilidad de la teledetección como herramienta complementaria para la monitorización de contaminantes atmosféricos, especialmente en ciudades intermedias.

La distribución espacial del PM2.5 mostró concentraciones más elevadas en sectores caracterizados por una alta intensidad de tráfico y actividad urbana, especialmente en zonas cercanas a la terminal de autobuses y a las principales avenidas. Este patrón espacial concuerda con estudios similares realizados en otras ciudades de la región, en los que el parque automotor constituye una de las principales fuentes de emisión de material particulado fino, especialmente en periodos secos.

El valor promedio estimado de PM2.5 para agosto de 2023 ($23,51 \mu\text{g}/\text{m}^3$) supera los valores guía recomendados por la Organización Mundial de la Salud, por lo que existe un riesgo potencial para la salud de la población expuesta. Esta situación subraya la necesidad de reforzar las estrategias de gestión ambiental y de control de emisiones en las zonas más afectadas de la ciudad.

Aunque los resultados obtenidos son satisfactorios, se identifican algunas limitaciones relacionadas con la disponibilidad temporal de los datos de monitoreo, la diferencia horaria entre la adquisición de las imágenes por satélite y los registros in situ, y el hecho de que no se hayan incluido explícitamente variables meteorológicas en el modelo. Estas condiciones pueden influir en las diferencias observadas entre los valores estimados y medidos, pero no invalidan la aplicabilidad del enfoque propuesto.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que la combinación de datos satelitales y técnicas de regresión es una alternativa eficaz para estimar y analizar espacialmente el PM2.5, y aporta información relevante para la gestión de la calidad del aire y la planificación urbana en el municipio de Sucre.

Conclusiones

Este estudio demuestra que la integración de imágenes satelitales Sentinel-2A con datos de monitoreo in situ permite estimar de manera fiable las concentraciones de PM2.5 en la zona urbana de

Sucre e identificar patrones espaciales asociados al tráfico rodado y a la actividad urbana.

El modelo de regresión lineal múltiple seleccionado presentó un alto grado de precisión ($R^2 = 0,92$), lo que evidencia que la teledetección de alta resolución es una herramienta eficaz para el monitoreo de la calidad del aire en ciudades intermedias y de esta manera orientar estrategias de gestión ambiental y protección de la salud pública.

Referencias

- Castro, P., Vera, J., Cifuentes, L., Wellenius, G., Verdejo, H., Sepúlveda, L., Vukasovic, J. L., & Llevaneras, S. (2010). Polución por material particulado fino (PM2.5) incrementa las hospitalizaciones por insuficiencia cardiaca. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, 26(3), 163–170. https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-85602010000300004
- Gomez, L. (2024). Determinación de PM10 en Sucre con imágenes satelitales Landsat 8 y datos de monitoreo in situ. *Revista Ingeniería Sostenible Ambiental*, 1(1), 33-40. <https://doi.org/10.56469/risa.v1i1.1970>
- Guo, C., Zhang, Z., Lau, A., Tam, T., Chan, T.-C., Lao, X., & Chang, L. (2018). Satellite-Based Estimates of Long-Term Exposure to PM2.5 and its Association with Chronic Obstruct Pulmonary Disease in Taiwan Adults. En *ISEE Conference Abstracts* (Vol. 2017). <https://doi.org/10.1289/isee.2017.2017-284>
- Guo, Y., Feng, N., Christopher, S. A., Kang, P., Zhan, F. B., & Hong, S. (2014). Satellite remote sensing of fine particulate matter (PM2.5) air quality over Beijing using MODIS. *International Journal of Remote Sensing*, 35(17), 6522-6544. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.958245>
- Mozafari, S. M., Hasanlou, M., & Arefi, H. (2019). *Archivos ISPRS* - Estimación de la contaminación atmosférica mediante el espesor óptico de aerosoles con imágenes OLI en Teherán. *ISPRS Archives*, XLII-4/W18, 779–784. <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLII-4-W18/779/2019/isprs-archives-XLII-4-W18-779-2019>
- High-resolution aerosol retrieval over urban areas using Sentinel-2 data. (2023). *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/354155901_High-resolution_aerosol_retrieval_over_urban_areas_using_sentinel-2_data
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., ... & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026> (doi.org in Bing)
- SSPH+. (2019). WHO air quality guidelines 2021 – Aiming for healthier air for all: A joint statement by medical, public health, scientific societies and patient representative organisations. *International Journal of Public Health*, 66, 1604465. <https://www.ssph-journal.org/journals/international-journal-of-public-health/articles/10.3389/ijph.2021.1604465/full>
- Oliveira, M., Slezakova, K., Delerue-Matos, C., Pereira, M. C., & Morais, S. (2019). Children environmental exposure to particulate matter and polycyclic aromatic hydrocarbons and biomonitoring in school environments: A review on indoor and outdoor exposure levels, major sources and health impacts. *Environment International*, 124, 180-204. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.052>

- Querol, X., Tobías, A., Pérez, N., Karanasiou, A., Amato, F., Stafoggia, M., Pérez García-Pando, C., Ginoux, P., Forastiere, F., Gumy, S., Mudu, P., & Alastuey, A. (2019). Monitoring the impact of desert dust outbreaks for air quality for health studies. *Environment International*, 130, 104867. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.05.061>
- Tello-Cifuentes, L., & Díaz-Paz, J. P. (2021). Análisis de la contaminación ambiental usando técnicas de teledetección y análisis de componentes principales. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 100(1), 22–34. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-77992021000100022&script=sci_arttext
- Van Donkelaar, A., Martin, R. V., Brauer, M., Kahn, R., Levy, R., Verduzco, C., & Villeneuve, P. J. (2010). Global Estimates of Ambient Fine Particulate Matter Concentrations from Satellite-Based Aerosol Optical Depth: Development and Application. *Environmental Health Perspectives*, 118(6), 847-855. <https://doi.org/10.1289/ehp.0901623>
- Venegas, L. E., & Mazzeo, N. A. (2010). An ambient air quality monitoring network for Buenos Aires city. *International Journal of Environment and Pollution*, 40(1-3), 184-194. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2010.030921>
- WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. (2023.), de https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228?utm_source=chatgpt.com