

Determinación de PM10 en Sucre con imágenes satelitales Landsat 8 y datos de monitoreo in situ**Determination of PM10 in Sucre with Landsat 8 satellite images and in situ monitoring data**GOMEZ - Luis^{1*}

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

Recibido diciembre, 2023; Aceptado noviembre, 08, 2024

Resumen

El propósito de esta investigación es encontrar una ecuación empírica para determinar los niveles de concentración de PM10 a partir de imágenes satelitales Landsat 8 Oli con un 10% de cobertura de nubes y datos de monitoreo in situ en la ciudad de Sucre.

Para la obtención de la ecuación empírica solo se trabajó con una estación de monitoreo ubicado en el Parque Bolívar debido a la falta de correlación con las otras estaciones de monitoreo y las reflectancias de las imágenes satelitales Landsat 8.

Los resultados demostraron una relación significativa entre las mediciones in situ de PM10 y las reflectancias de las imágenes satelitales Landsat-8. Para el período de estudio del 2015 al 2022 y se identificó que las bandas 2 y 5 de las imágenes satelitales son cruciales para predecir las concentraciones de PM10, con un alto valor de correlación ($R^2 = 0.86$) y un bajo error cuadrático medio (RMSE = 3.94%).

Se hizo una comparación con mapas de concentración de PM10 para temporadas húmedas y secas para cada año desde 2015-2022 que revelaron un nivel medio de riesgo a la exposición de PM10 en gran parte del distrito 2, resaltando áreas vulnerables que requieren atención urgente.

Palabras clave: Contaminación por PM10, teledetección, Mapa de PM10, nivel de riesgo, Distrito 2 – Sucre Bolivia

Abstract

The objective of this research is to develop an empirical equation to estimate PM10 concentration levels using Landsat 8 OLI satellite imagery with up to 10% cloud cover, combined with in situ monitoring data in the city of Sucre.

Due to a lack of correlation between satellite reflectance and data from other monitoring stations, the analysis focused exclusively on a single monitoring station located in Parque Bolívar.

The results demonstrated a significant relationship between in situ PM10 measurements and the reflectance values from Landsat 8 imagery over the study period from 2015 to 2022. Specifically, bands 2 and 5 of the satellite images were identified as key predictors of PM10 concentrations, yielding a high coefficient of determination ($R^2 = 0.86$) and a low root mean square error (RMSE = 3.94%).

Comparative analyses of PM10 concentration maps for wet and dry seasons from 2015 to 2022 revealed a moderate risk level of PM10 exposure across much of District 2, highlighting vulnerable areas that require urgent mitigation efforts.

Keywords: PM10 pollution, remote sensing, PM10 map, risk level, District 2 - Sucre Bolivia

Citación: Gómez L. Determinación de PM10 en Sucre con imágenes satelitales Landsat 8 y datos de monitoreo in situ, Revista Ingeniería Sostenible Ambiental 2024,1(1),1-50

Introducción

La contaminación atmosférica representa una amenaza significativa para la salud. El 91% de la población mundial reside en áreas donde los niveles de contaminación del aire superan los estándares recomendados por la OMS. Tanto los países desarrollados como los que están en desarrollo se ven afectados, siendo estos últimos los más perjudicados debido a múltiples fuentes de emisiones relacionadas con el uso de energía a partir de hidrocarburos (Organización Mundial de la Salud, 2021).

La contaminación medioambiental se ha convertido en un problema de salud pública para Bolivia. La polución atmosférica en el país se debe, principalmente, a emisiones producidas por el parque automotor y las industrias: Santa Cruz, Cochabamba y La Paz son algunas de las ciudades con mayor polución, mientras que en las zonas rurales en cambio la calidad de vida de la población se ve afectada por el uso de leña y carbón (El Diario, 2019).

Según el informe anual nacional (Red MoniCA, 2019) el contaminante que sobrepasa los límites máximos permisibles en muchas estaciones de monitoreo a nivel nacional son los PM10 y en diferentes periodos de exposición (evaluaciones de 24 horas y anuales), provocando un mayor riesgo de salud en la población.

Se han establecido tres estaciones de monitoreo de PM10 zonas de alto tráfico vehicular en la ciudad de Sucre, los valores promedio de concentración de partículas PM10 muestran su punto máximo durante los meses de mayo, junio, julio y agosto. Posteriormente, disminuyen de manera constante en los meses subsiguientes, y esto se atribuye a las condiciones climáticas (Red MoniCA, 2019).

En el trabajo de investigación en la ciudad de Teherán titulada Air Pollution Estimation Using Aerosol Optical Thickness by Oli Images in Tehran (Hasanlou, et al., 2019). Se sugiere que el estudio de la reflectancia atmosférica del Landsat-8, OLI es una buena alternativa para monitorear la calidad del aire en la Tierra

La viabilidad de los algoritmos propuestos se investigó con base en el coeficiente de correlación (R) y el error cuadrático medio (RMSE) y normalizar el error cuadrático medio (NRMSE) en comparación con los datos de medición in situ PM2.5 y PM10. La elección de nuestro modelo multiespectral propuesto se basó en el valor R más alto y el valor más bajo del RMSE y, por lo tanto, en el valor más bajo del NRMSE con datos in situ PM10. Los resultados de esta investigación mostraron que las bandas visibles de Landsat 8 OLI eran capaces de calcular la concentración de PM2.5 y PM10 con un nivel aceptable de precisión.

El constante crecimiento poblacional, económico y la falta de un plan de ordenamiento territorial en la ciudad son las causas de diferentes fuentes de contaminación atmosférica. Según (Abad & Mejía, 2017) los valores de concentración de material particulado PM10 pueden ser obtenidos realizando el procesamiento de imágenes satelitales y efectuando una correlación con los datos de las estaciones de la calidad del aire.

La Red MoniCA cuenta con 3 sitios de monitoreo de material particulado PM10 que están instalados en áreas de alto tráfico vehicular (Parque Bolívar, Terminal de Buses, Facultad de Medicina), debido al incremento del parque automotor se tiene en la ciudad un aumento de fuentes de contaminación móvil además de otros focos de contaminación debido a las actividades económicas de la ciudad (Red MoniCA, 2019).

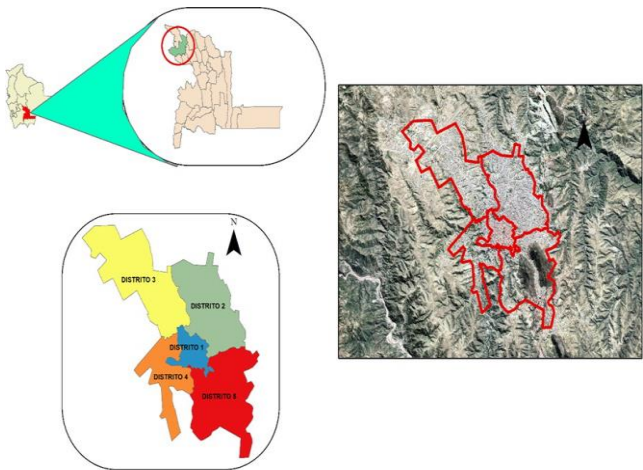
El presente trabajo de investigación tiene por objetivo estimar la concentración de material particulado PM10 a partir del procesamiento de datos de imágenes satelitales Landsat 8 en consecuencia obtenemos los valores de reflectancias en superficie y así realizar una correlación con los datos adquiridos por la red MoniCA y obtener un modelo inductivo o empírico para espacialización de la concentración de PM10.

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 2750 m.s.n.m. . El área total es de 1.721,69 km2 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 PM10 in situ

La Red MoniCA Sucre tiene actualmente en funcionamiento 2 metodologías de monitoreo para obtener niveles de concentración de PM10, la primera es la metodología de monitoreo por muestreo activo, de la cual se tienen 2 equipos en funcionamiento y la otra metodología de monitoreo es por muestreo automático. Se obtuvo el historial de datos in situ desde la gestión 2015-2022 de la Secretaria de Medio Ambiente del Gobierno Autonomo Municipal de Sucre.

Imágenes OLI de Landsat 8

Este estudio comenzó con la búsqueda de imágenes satelitales Landsat 8 OLI/TIRS correspondientes al período de 2015 a 2022 con 10% de nubosidad, en total se descargaron 64 imágenes y se utilizaron las bandas 1 al 5.

Tabla 1. Características espectrales y espaciales de las bandas Landsat 8.

Bandas	Longitud de onda		Resolución
Banda 1	Coastal Aerosol	(0.43 -0.45 μm)	30 m
Banda 2	Blue	(0.450 -0.51 μm)	30 m
Banda 3	Green	(0.53 -0.59 μm)	30 m
Banda 4	Red	(0.64 -0.67 μm)	30 m
Banda 5	Near-Infrared	(0.85 -0.88 μm)	30 m
Banda 6	SWIR 1	(1.57 -1.65 μm)	30 m
Banda 7	SWIR 2	(2.11 -2.29 μm)	30 m
Banda 8	Panchromatic (PAN)	(0.50 -0.68 μm)	15 m
Banda 9	Cirrus	(1.36 -1.38 μm)	30 m
Banda 10	TIRS 1	(10.6 -11.19 μm)	100 m
Banda 11	TIRS 2	(11.5 -12.51 μm)	100 m

Metodología para la estimación del PM10 con teledetección

1. Selección de las imágenes satelitales: Se debe seleccionar una imagen satelital adecuada que tenga una resolución espacial y temporal apropiada. para el estudio se utilizó las imágenes Landsat 8 descargadas de la página web del USGS.

2. Preprocesamiento de las imágenes: consiste en convertir los ND a valores de radiancia y posteriormente a valores de reflectancia de superficie mediante el software Envi 5.3

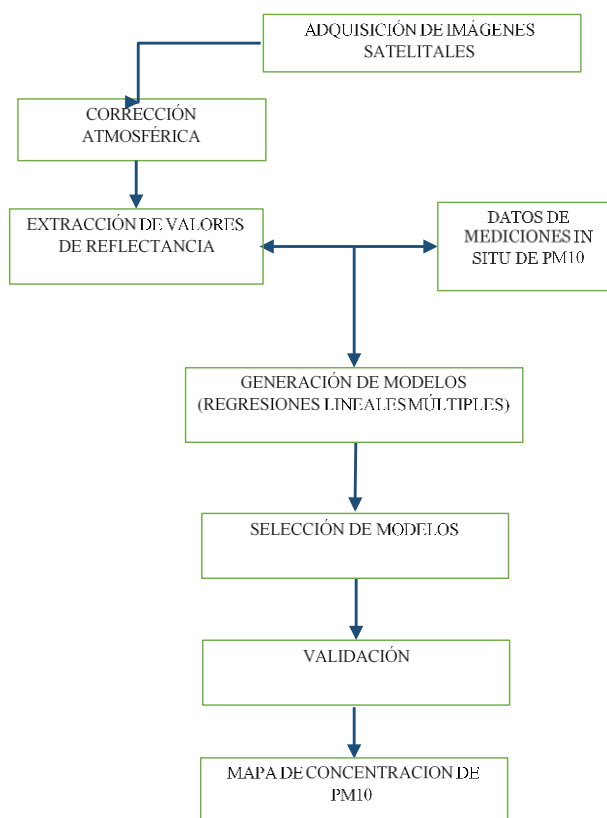
3. Construcción de matrices: se debe formar matrices con los datos de las mediciones in situ y el valor de las reflectancias de superficie y con el programa estadístico Rstudio realizar las regresiones lineales múltiples para obtener las ecuaciones empíricas para mapear el PM10

4. Validación de los resultados: Es importante validar los resultados obtenidos con indicadores estadísticos en este caso coeficiente de correlación, error cuadrático medio y el AIC (Criterio de Información de Akaike), que nos filtraría los mejores modelos de regresión lineal y también es necesario comparar los valores in situ con los valores generados por el modelo. Esto permitirá determinar la precisión y fiabilidad de la estimación.

5. Generación de mapas y análisis: Finalmente, se pueden generar mapas de la concentración de PM10 a partir de los resultados obtenidos y realizar análisis para identificar patrones espaciales y temporales en la distribución de estas partículas.

:

Figura 2 Esquema Metodológico para la estimación del PM10



Resultados

En el desarrollo de este proyecto, se emplearon modelos generados a partir de la extracción de valores de reflectancia de diferentes bandas espectrales. Estos valores fueron tabulados en una matriz de datos utilizando el programa Excel, para posteriormente ser exportados al entorno estadístico RStudio. En RStudio, se llevaron a cabo análisis mediante modelos de regresión lineal múltiple, con el fin de identificar relaciones significativas entre las variables. Los modelos seleccionados, basados en la mayor significancia estadística, fueron luego procesados en el software ENVI 5.3 para generar un mapa temático que representara tanto los niveles de concentración como los niveles de riesgo asociados a la exposición a partículas PM10.

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

Mod	R2	RMSE	AIC	AÑO
2	0,8835	4,907	58,52248	2015
3	0,895	4,66	57,59266	2015
4	0,9016	5,524	61,00539	2015
5	0,903	5,485	60,87777	2015
6	0,8861	5,942	62,31801	2015
16	0,849	4,218	55,18951	2017
18	0,8522	4,174	54,99708	2017
19	0,9609	2,541	47,0394	2017
20	0,9674	2,595	47,40449	2017
29	0,849	4,127	55,40738	2021
30	0,8592	3,985	54,77876	2021
31	0,8599	4,355	56,73416	2021
32	0,8592	4,88	58,77491	2021
33	0,849	5,053	59,40397	2021

Se generaron un total de 14 modelos a partir de tres matrices de datos correspondientes a los años 2015, 2017 y 2021. Los modelos fueron evaluados utilizando el criterio del AIC (Criterio de Información de Akaike), destacándose en amarillo aquellos modelos con los valores más bajos de AIC, ya que este indicador es fundamental para seleccionar el mejor modelo dentro de una matriz de datos. Como resultado, se identificaron tres modelos destacados, los cuales fueron posteriormente utilizados para la espacialización en el software ENVI 5.3.

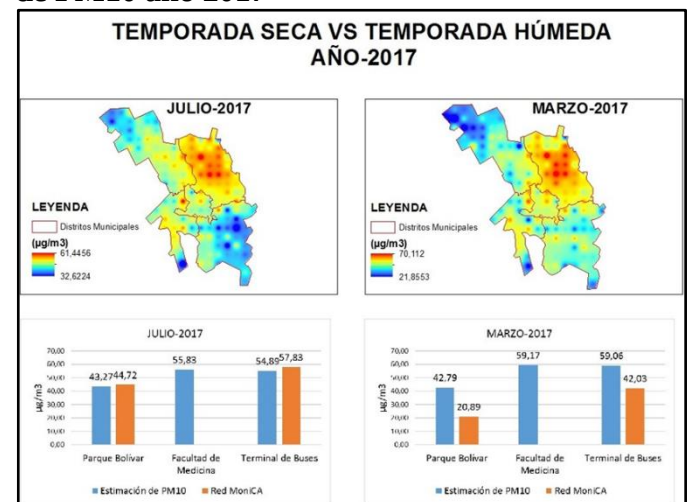
Durante la fase de espacialización, se observó que el modelo 30 fue el más adecuado para mapear las concentraciones de PM10. Este modelo fue seleccionado con base en el siguiente criterio: los valores generados en los puntos de monitoreo ubicados en la terminal de buses mostraron una cercanía notable con los valores medidos, a excepción de los datos en la Facultad de Medicina, donde no se dispone de información. En contraste, los modelos 5 y 19 presentaron valores inferiores a los registrados en el punto de monitoreo del Parque Bolívar. por los criterios descritos el modelo que mejores resultados proporciona para mapear el PM10 es:

$$PM10 = -0,1032278*B2 + 0,0368234*B5 + -0,2793$$

Tabla 3 Comparación de valores estimados vs. valores de monitoreo de pm10 para la temporada seca y húmeda

Julio 2017				
Ubicación	PM10 ESTIMADO (MODELO) (µg/m3)	PM10 (Red MoniC A) (µg/m ³)	Error de validación	Error de validación promedio (%)
Parque Bolívar	43.27	44.72	1.45	2.19
Facultad de Medicina	55.83			
Terminal de Buses	54.89	57.83	2.94	
Marzo 2022				
Ubicación	PM10 ESTIMADO (MODELO) (µg/m3)	PM10 (Red MoniC A) (µg/m ³)	Error de validación	Error de validación promedio (%)
Parque Bolívar	41.35	26.04	15.31	13.75
Facultad de Medicina	58.13	35.15	22.97	
Terminal de Buses	50.06	47.08	2.98	

Figura 3 Distribución espacial de los niveles de PM10 año 2017



Discusión

En el presente estudio, se realizó un análisis de los niveles de PM₁₀ en la ciudad de Sucre durante el período comprendido entre 2015 y 2022, centrándonos en dos temporadas claramente diferenciadas: la temporada seca que son los meses de abril a octubre y la temporada húmeda de noviembre a marzo. Para la comparación de niveles de PM₁₀ se procedió con dos imágenes satelitales por año, lo que proporcionó una visión completa de las variaciones a lo largo del tiempo. Una de las principales conclusiones de este análisis es la comparación entre las mediciones de la estación de monitoreo in situ y el modelo estimado de PM₁₀. Se observó que, en julio del 2017 se obtiene un error de 2.19%, y un valor máximo de error 45,76% del mes de junio de 2016. El porcentaje alto de error se debe a que las estaciones de monitoreo de la Facultad de Medicina y la Terminal de Buses no proporcionan datos continuos diarios como la estación de monitoreo del Parque Bolívar, existe una correspondencia razonable entre los datos obtenidos a través del modelo y las mediciones reales. Es relevante destacar que se observó una tendencia a un menor error durante la temporada seca en comparación con la temporada húmeda, lo que podría estar relacionado con factores climáticos y estacionales.

Además, se identificó un patrón notable de contaminación en el distrito 2 de la ciudad. A lo largo de todos los años estudiados, este distrito mostró niveles de riesgo medio de PM₁₀. Esto podría atribuirse a diversas actividades y condiciones locales, como la densidad del tráfico vehicular o la geografía de la zona. Estos resultados destacan la necesidad de una atención específica en esta área para abordar los problemas de contaminación y mejorar la calidad del aire. Este estudio proporciona una visión detallada de la concentración de PM₁₀ en Sucre durante un período significativo. Los resultados sugieren una correlación razonable entre las mediciones in situ y los valores estimados.

Asimismo, se subraya la importancia de implementar medidas de control y prevención de la contaminación atmosférica, especialmente en el distrito 2, con el objetivo de salvaguardar la salud pública y mejorar la calidad del aire en la ciudad.

Conclusiones

Este estudio caracteriza sistemáticamente las distribuciones espacio temporales de concentraciones de PM₁₀ para los 5 distritos urbanos de la ciudad de Sucre para el periodo 2015-2022 con las imágenes satelitales Landsat 8 OLI y monitoreo in situ.

El resultado indica que nuestro modelo puede calcular la contaminación del aire por PM₁₀ con un alto grado de precisión utilizando el valor de reflectancia de superficie de las bandas 2 y 5 de la imagen Landsat 8 OLI.

La investigación destaca que nuestro modelo demuestra su eficacia en las temporadas secas, que comprenden los meses de abril a septiembre, al obtener un menor nivel de error en contraste con las temporadas húmedas. Estos resultados sugieren que es viable cartografiar la contaminación del aire mediante datos satelitales, lo que amplía la cobertura geográfica.

Referencias

- Abad, L., & Mejía, D. (2017). EJE 07-07 Estimación de la concentración de material particulado menor a 10 micras a través de sensores remotos en el área urbana de la ciudad de Cuenca. *Memorias Y Boletines De La Universidad Del Azuay*, 1(XVI), 381–390. <https://doi.org/10.33324/memorias.v1iXVI.85>
- El Diario, 2019. Contaminación del aire pone en riesgo salud de la población. <https://www.eldiario.net/movil/index.php?n=55&a=2019&m=06&d=05>

- Mozafari, SM, Hasanlou, M. y Arefi, H.: estimación de la contaminación del aire utilizando el espesor óptico de aerosol mediante imágenes Oli en Teherán, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-4/W18, 779–782, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W18-779-2019>, 2019.
- Organizacion Mundial de la Salud, 2021. Contaminación atmosférica. https://www.who.int/es/health-topics/air-pollution#tab=tab_2 [Último acceso: 29 noviembre 2021].
- Red MoniCA, 2019. INFORME ANUAL 2019 RED DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE, Sucre: s.n.
- Christopher, S. A., & Gupta, P. (2010). Satellite Remote Sensing of Particulate Matter Air Quality: The Cloud-Cover Problem. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 60(5), 596–602. <http://doi.org/10.3155/1047-3289.60.5.596>
- Congedo, L., & Munafò, M. (2012). Development of a Methodology for Land Cover Classification in Dar es Salaam using Landsat Imagery, (January 2012), 48. Retrieved from <http://www.planning4adaptation.eu/>
- Dávila, M. (2016). Visita Técnica a la Estación de Monitoreo Activa de Calidad de Aire de la EMOV-EP. Emili, E., Popp, C., Riffler, M., & Bern, U. (2016). PM10 remote sensing from geostationary SEVIRI and polar-orbiting MODIS sensors over the complex terrain of the European Alpine region. *Remote Sensing of Environment*, 114(Sep-tember), 2485–2499. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2010.05.024>
- Grantz, D. ., Garner, J. H. ., & Johnson, D. . (2003). Ecological effects of particulate matter. *Environment International*, 29(2-3), 213–239. [http://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00181-2](http://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00181-2)
- Grosso, N., Ferreira, F., & Mesquita, S. (2007). Improvement in particles (PM10) urban air quality mapping interpolation using remote sensing data. *Air Pollution Modeling and Its Application XVIII*, Volume 6(07), 265–274. [http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S1474-8177\(07\)06031-7](http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S1474-8177(07)06031-7)
- 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. <http://doi.org/10.1080/01431161.2014.958245>
- Gupta, P., Christopher, S. a., Wang, J., Gehrig, R., Lee, Y., & Kumar, N. (2006). Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities. *Atmospheric Environment*, 40(30), 5880–5892. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.03.016>
- Hadjimitsis, D. G. (2009). Aerosol optical thickness (AOT) retrieval over land using satellite image-based algorithm. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 2, 89–97. <http://doi.org/10.1007/s11869-009-0036-0>
- Hameed, S., & Hasan, G. (2014). Estimation of PM10 Concentration using Ground Measurements and Landsat 8 OLI Satellite Image. *Journal of Geophysics & Remote Sensing*, 3(2), 1–6. <http://doi.org/10.4172/2169-0049.1000120>
- Hyndman, R. J. (2010). Why every statistician should know about cross-validation. Retrieved from <http://robjhyndman.com/hyndsight/crossvalidation/>
- Knight, E., & Kvaran, G. (2014). Landsat-8 Operational Land Imager Design, Characterization and Performance. *Remote Sensing*, 6(11), 10286–10305. <http://doi.org/10.3390/rs6110286>

Luo, N., Wong, M. S., Zhao, W., Yan, X., & Xiao, F. (2015). Improved aerosol retrieval algorithm using Landsat images and its application for PM10 monitoring over urban areas. *Atmospheric Research*, 153(0), 264–275.

<http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/>

Martinez, A. P., & Romieu, I. (2003). Estrategia De Monitoreo. In Comunidad Europea (Ed.), *Introducción al monitoreo atmosférico*. (pp. 7–37). Bruselas: Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental. Retrieved from <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/intromon/cap2.pdf>

Meena, G. S., Londhe, A. L., Bhosale, C. S., & Jadhav, D. B. (2009). Remote sensing “ground-based automatic UV / visible spectrometer ” for the study of atmospheric trace gases. *International Journal of Remote Sensing*, 30(21), 5633–5653. <http://doi.org/10.1080/01431160802698901>