

ESTIMACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA MEDIANTE MODELO GENERADO POR IMÁGENES SATELITALES DE LA CIUDAD DE SANTA CRUZ DE LA SIERRA

ESTIMATION OF ATMOSPHERIC POLLUTION USING A MODEL GENERATED BY SATELLITE IMAGES OF THE CITY OF SANTA CRUZ DE LA SIERRA

PADILLA ESQUIVEL, M., FLORES PÉREZ, I. I.

RESUMEN

Uno de los mayores problemas de la contaminación atmosférica en Santa Cruz de la Sierra, debido al arrastre del viento, son las partículas sólidas o líquidas con un tamaño menor a los 10 micrómetros (PM_{10}) generados por el alto nivel de tráfico y las actividades industriales. En los últimos años se han desarrollado técnicas que permiten la detección de la contaminación del aire, mediante la obtención de información multispectral a partir de imágenes satelitales. Se desarrolló también un modelo empírico multispectral utilizando datos del satélite Landsat 8 TIRS encontrándose una buena correlación entre la reflectancia atmosférica de las bandas visibles y la concentración de PM_{10} a nivel del suelo. Si los modelos generados a partir de imágenes satelitales junto con los datos tomados in situ, adaptados a modelos de regresión simple y múltiple siendo una alternativa para la detección. Se adquirió todas las imágenes satelitales correspondientes al área de estudio y la información in situ tomada por una estación automática. Se realizó el procesamiento para obtener la reflectancia TOA y la reflectancia de superficie y luego se calculó la reflectancia atmosférica, generación de modelos y su respectiva validación, para lo cual se realizará un análisis de la relación entre la variable de PM_{10} y las reflectancias obtenidas de las imágenes Landsat 8, a través del método de regresión lineal múltiple. Se adquirieron en total 12 imágenes satelitales, recuperadas en path 231 y row 72, del visor de la USGS. Estas imágenes cumplieron con la condición establecida de presentar un porcentaje de nubosidad por debajo del 25 %. El porcentaje de nubosidad va desde 0.36% hasta 21,96 %. Se desarrolló el modelo para estimar la concentración de PM_{10} . Este modelo presentó un coeficiente de determinación R^2 de 0,587 y un RMSE de 5,5. El mejor modelo hace uso de las bandas 5 y 10. Los valores predichos por el modelo son consistentes. Las áreas verdes presentan valores bajos en comparación a las áreas con alto nivel de urbanización. Áreas como Parque Industrial y San Aurelio presentan valores altos, por lo que se considera que el modelo arroja valores congruentes.

ABSTRACT

One of the biggest problems of air pollution in Santa Cruz de la Sierra, due to wind drag, are solid or liquid particles with a size smaller than 10 micrometers (PM_{10}) generated by the high level of traffic and industrial activities. In recent years, techniques have been developed that allow the detection of air pollution, by obtaining multispectral information from satellite images. An empirical multispectral model was also developed using data from the Landsat 8 TIRS satellite, finding a good correlation between the atmospheric reflectance of the visible bands and the concentration of PM_{10} at ground level. If the models generated from satellite images together with the data taken in situ, adapted to simple and multiple regression models being an alternative for detection. All the satellite images corresponding to the study area and the information in situ taken by an automatic station were acquired. The processing was carried out to obtain the TOA reflectance and the surface reflectance and then the atmospheric reflectance was calculated, generation of models and their respective validation, for which an analysis of the relationship between the PM_{10} variable and the reflectances obtained from Landsat 8 images, through the multiple linear regression method. A total of 12 satellite images were acquired, recovered at path 231 and row 72, from the USGS viewer. These images met the established condition of presenting a percentage of cloud cover below 25%. The percentage of cloudiness ranges from 0.36% to 21.96%. The model was developed to estimate the concentration of PM_{10} . This model presented a coefficient of determination R^2 of 0.587 and an RMSE of 5.5. The best model makes use of bands 5 and 10. The values predicted by the model are consistent. Green areas present low values compared to areas with a high level of urbanization. Areas such as Parque Industrial and San Aurelio present high values, so it is considered that the model produces matching values.

PALABRAS CLAVE

Imágenes satelitales, PM_{10} , Reflectancia TOA, Reflectancia superficial, Reflectancia atmosférica.

KEYWORDS

Satellite images, PM_{10} , TOA reflectance, Surface reflectance, Atmospheric reflectance.

INTRODUCCIÓN

En Santa Cruz de la Sierra, la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire se encarga de realizar el control y monitoreo de la contaminación atmosférica. De acuerdo a este organismo, uno de los mayores problemas, debido al arrastre del viento, son las partículas sólidas o líquidas con un tamaño menor a los 10 micrómetros generados por el alto nivel de tráfico y las actividades industriales. Existen 4 estaciones de monitoreo de PM_{10} en la ciudad; cantidad determinada en función a la población y nivel de tráfico vehicular. También depende de los recursos económicos del municipio para su implementación y mantenimiento. Sin embargo, los valores obtenidos solo representan el punto donde se encuentran, generalizando la situación para toda el área de la ciudad. Generar un modelo matemático a partir del procesamiento digital de imágenes satelitales para determinar la contaminación atmosférica por PM_{10} , puesto que esta metodología ofrece un mayor alcance, tiene pocas limitaciones económicas y podría ser empleada como alternativa o complemento. Primero, se procederá a la recopilación de la información, luego se desarrollará el modelo y su posterior validación y finalmente, se realizará el monitoreo de la contaminación atmosférica por PM_{10} .

De acuerdo a la Norma Boliviana NB62011:2008, Calidad del aire – Contaminantes criterio exterior – Límites máximos permisibles del Instituto Boliviano de Normalización y Calidad, se establecen los siguientes contaminantes criterio: monóxido de carbono, ozono, dióxido de nitrógeno, material particulado con diámetro equivalente menor a PM_{10} , dióxido de azufre, material particulado equivalente menor a 2,5 micras, plomo y partículas totales en suspensión (Red de Monitoreo de la Calidad del Aire, 2016). Las PM_{10} son partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire, compuestas por una química diversa y tamaño menor a 10 micras. En los últimos años se han desarrollado técnicas que permiten la detección de la contaminación del aire, mediante la obtención de información multiespectral a partir de imágenes satelitales, provenientes de sensores remotos (Torres & Vivanco, 2018). Un estudio en Lisboa describe una metodología para mejorar el mapeo del PM_{10} mediante el uso de métodos geoestadísticos para interpolar datos obtenidos por la relación lineal entre datos Aerosol Optical Thickness, AOT, recuperados del satélite y valores de las estaciones en tierra, utilizando imágenes MODIS del año 2001. Los resultados obtenidos por este método han mostrado algunas áreas de alta concentración no identificadas por los inventarios de emisiones o las mediciones en tierra (Grosso, Ferreira, & Mesquita, 2007). En el 2014, un modelo empírico fue generado para la determinación de partículas en la atmósfera utilizando bandas visibles de la imagen satelital Landsat 8 OLI sobre la ciudad de Kirkuk, Iraq. El modelo multiespectral se basa en el coeficiente de correlación de valor más alto y el valor más bajo de la media raíz error cuadrado con datos in situ de PM_{10} . Los resultados de esta investigación mostraron que las bandas visibles de Landsat 8 OLI fueron capaces de calcular la concentración de PM_{10} a un nivel aceptable de precisión (Hameed & Hasan, 2014). También se desarrolló un modelo empírico multiespectral utilizando datos del satélite Landsat 8 TIRS para estimar la concentración de PM_{10} sobre la ciudad de Delhi en India, encontrándose una buena correlación entre la reflectancia atmosférica de las bandas visibles y la concentración de PM_{10} a nivel del suelo (Saraswat, Mishra, & Kumar, 2017). Por otra parte, una investigación definió si los modelos generados a partir de imágenes satelitales junto con los datos tomados in situ, adaptados a modelos de regresión simple y múltiple, podrían ser ocupados en Ecuador, obteniéndose resultados satisfactorios para la ciudad de Quito. Esta metodología podría ser una alternativa para otras ciudades que no tienen los recursos para adquirir y mantener estaciones de monitoreo (Alvarez & Padilla, 2014). A nivel nacional no se han encontrado estudios sobre el uso de imágenes satelitales para la estimación de contaminantes atmosféricos. De acuerdo al Manual Técnico para el Diseño, Implementación y Operación de

Redes de Monitoreo de Calidad del Aire para ciudades en Bolivia, para la selección de la técnica de muestreo y metodología de monitoreo existen parámetros que deben ser considerados para evaluar la factibilidad y rendimiento de una técnica analítica o de un equipo de medición. Actualmente, en el país se utilizan los muestreos pasivo, activo y automático. Sin embargo, se menciona el muestreo con sensores remotos como un tipo de muestreo a considerarse (Vásquez & Vargas, 2016). Uno de los mayores problemas por contaminación atmosférica que presenta Santa Cruz de la Sierra son las partículas de materia sólida, debido al arrastre del viento. Por lo que, a partir del 2004, con la iniciación del Proyecto de Aire Limpio, llamado Red de Monitoreo de Calidad del Aire (Red MoniCA), se monitorean y analizan las condiciones de contaminación atmosférica en la ciudad. (Red de Monitoreo de la Calidad del Aire, 2011).

El Informe Nacional de Calidad de Aire de Bolivia – 2015 detalla que el Gobierno Autónomo Municipal de Santa Cruz de la Sierra y la Universidad Privada de Santa Cruz operaban de forma coordinada la Red MoniCA. Las funciones de operación y mantenimiento de monitoreo con tecnología activa eran responsabilidad de la Universidad Privada de Santa Cruz mientras que las funciones de operación y mantenimiento de monitoreo con tecnología automática, del gobierno municipal. Sin embargo, desde el 2016 solo se encuentra en funcionamiento la estación automática ubicada en la Ex Terminal. La estación tiene un tiempo de monitoreo de 24 horas, por lo tanto, se obtienen valores de PM_{10} diarios.

DESARROLLO

Se utilizaron los softwares ENVI, ArcGis y RStudio.

Se llevaron a cabo 3 fases: Primero, se adquirió todas las imágenes satelitales correspondientes al área de estudio y la información in situ tomada por la estación automática. Se realizó el procesamiento para obtener la reflectancia TOA y la reflectancia de superficie y luego se calculó la reflectancia atmosférica. La segunda fase consistió en la generación de modelos y su respectiva validación, para lo cual se realizará un análisis de la relación entre la variable de PM_{10} y las reflectancias obtenidas de las imágenes Landsat 8, a través del método de regresión lineal múltiple. Tomando en cuenta que la regresión lineal múltiple establece la relación entre una variable dependiente y un conjunto de variables independientes. La regresión lineal múltiple, ecuación 1.

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_nx_n \quad (1)$$

Donde Y es la variable dependiente, b es el coeficiente establecido por la regresión y x es la variable independiente.

Los valores de reflectancia de las primeras cinco bandas espectrales (Aerosol, Blue, Green, Red y NIR) serán las variables independientes. Para obtener estos valores, se procederá a convertir los niveles digitales (ND) originales de cada banda a valores de reflectancia en el techo de la atmósfera (R_{TOA}). Este valor se extraerá del pixel que representa el área donde se encuentra ubicada la estación de monitoreo y se procederá por medio del software ArcGis. El segundo tratamiento consiste en convertir

los valores de radiancia a reflectancia de superficie (R_s) y corregirle los efectos producidos por la atmósfera, este tratamiento se realizará por medio del software de procesamiento digital de imágenes ENVI (Castro, 2019). Finalmente, se relaciona ambas variables para obtener la reflectancia atmosférica. Ecuación 2

$$R_{atm} = R_{TOA} - R_s \quad (2)$$

Donde R_{atm} es la reflectancia atmosférica para cada banda de la imagen, R_{TOA} es la reflectancia en la parte superior de la atmósfera y R_s es la reflectancia de la superficie. (Castro, 2019).

La variable dependiente será el valor estimado de PM_{10} , partiendo de que existe una equivalencia entre las características del AOT y PM_{10} . Este planteamiento ha sido considerado por autores que sugieren la existencia de una correlación lineal entre ambos (Castro, 2019). Ecuación 3.

$$AOT(\lambda) = \alpha_0 * R_{atm}(\lambda_1) + \alpha_1 * R_{atm}(\lambda_2) + \dots + \alpha_n * R_{atm}(\lambda_n) \quad (3)$$

Donde $AOT(\lambda)$ es el mismo PM_{10} (variable dependiente del análisis), $R_{atm}(\lambda)$ es la reflectancia atmosférica de cada banda (variables independientes del análisis) y α es el coeficiente de regresión asociado a cada variable independiente en las diferentes bandas. (Castro, 2019)

Una vez obtenidos los modelos, estos pasarán por un proceso de validación. La técnica de validación inicial de todos los modelos generados se realizará en base a los modelos que presenten un mayor coeficiente de determinación R^2 y menor error típico de estimación. Seleccionados los mejores modelos, se utilizará una imagen satelital para una segunda validación, buscando analizar la relación estadística del valor del PM_{10} observado con el valor del PM_{10} estimado a partir de la aplicación de los mejores modelos sobre la imagen, obteniendo el error de validación y la desviación estándar, para luego proceder a elegir el modelo con los mejores resultados. utilizando el coeficiente de determinación y el RMSE. Se obtuvieron modelos que pasaron por un segundo proceso de validación, utilizando una imagen que no fue tomada en cuenta para la generación de modelos, y se obtuvo el mejor modelo. En la tercera fase se procedió a la aplicación del mismo en las imágenes, generación de mapas temáticos y posterior análisis de resultado.

La información obtenida corresponde a los datos adquiridos por esta estación en los años 2014, 2017 y 2020. No se tiene registros de las otras 3 estaciones en los años anteriores a 2016.

Con los datos de PM_{10} obtenidos se procedió a la descarga de las imágenes satelitales LANDSAT 8 OLI/TIRS existentes en el periodo a evaluar (enero a septiembre del año 2020). Las imágenes fueron adquiridas por medio del visor de la USGS (Servicio Geológico de Estados Unidos).

Para identificar una imagen satelital Landsat 8 de forma análoga a los valores de longitud y latitud se utilizan parámetros conocidos como path y row. Se recuperaron las imágenes satelitales en path: 231 y row: 72. Las imágenes a utilizar son productos del satélite Landsat 8. Se utilizó la Colección 1 Nivel 1. Las imágenes fueron filtradas mediante la herramienta de búsqueda del visor USGS, para obtener los productos correspondientes a las gestiones 2014, 2017 y 2020 y que presenten un nivel de cobertura de nubes por debajo del 25 %. El parámetro de cobertura de nubes es considerado para realizar la elección de las mejores imágenes libres de anomalía como bruma o nubes.

Cada una de las imágenes fue visualizada en el software de ENVI para verificar que el área de estudio se encuentre despejada. Si bien las imágenes satelitales descargadas cumplieron con la condición mencionada anteriormente, es primordial que el área de estudio también se encuentre libre de nubosidad. En el caso de las imágenes correspondientes al año 2020, la imagen satelital tomada en fecha 29 de febrero presentó un porcentaje del 15,62% de nubosidad, sin embargo, quedó descartada por no presentar el área de estudio despejada. Todas las imágenes correspondientes al año 2017 no presentaron problemas en el área de estudio.

En las imágenes correspondientes al año 2014, las imágenes tomadas en fechas: 17 de abril, 6 de julio, 24 de septiembre y 10 octubre, tenían niveles de nubosidad del 12,83 %, 18,42 %, 14,48 % y 17,5 % respectivamente. Sin embargo, el área de estudio se veía afectada por la nubosidad, por lo que fueron descartadas. En total, se obtuvieron 12 imágenes que cumplieran con el requisito de bajo porcentaje de nubosidad en el área de estudio.

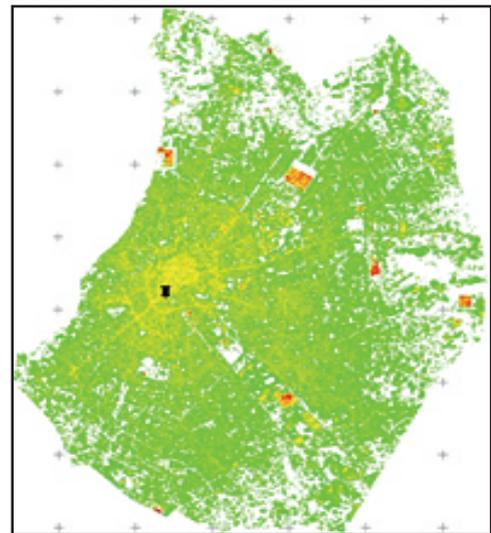


Figura 1. 1 de abril 2020

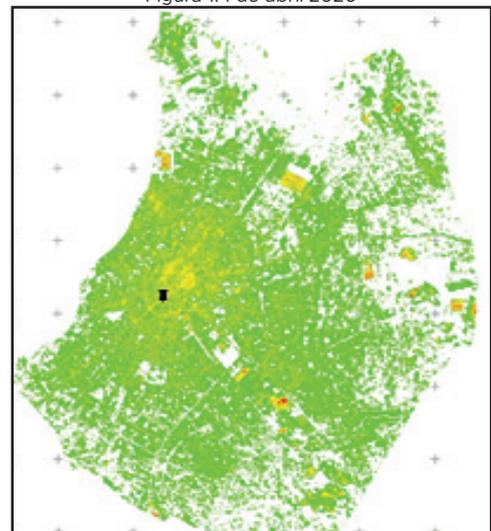


Figura 2. 17 de abril 2020

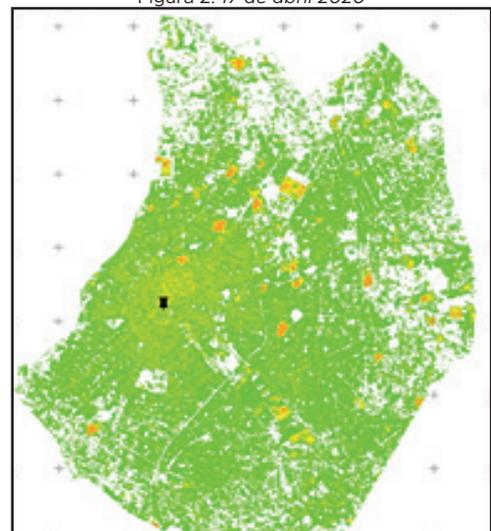


Figura 3. 19 de mayo 2020



Figura 4. 17 de abril 2020

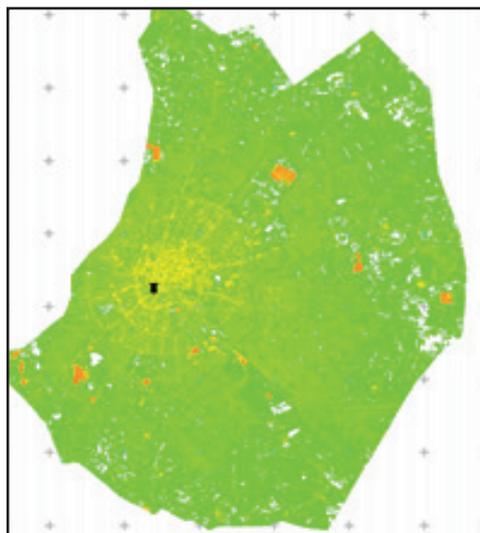


Figura 7. 14 de julio 2017

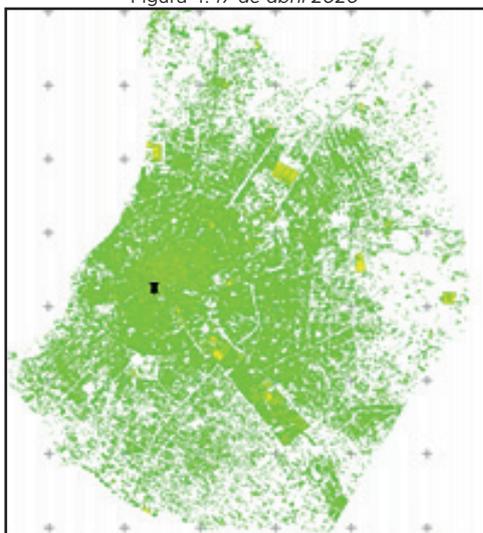


Figura 5. 7 de agosto 2020

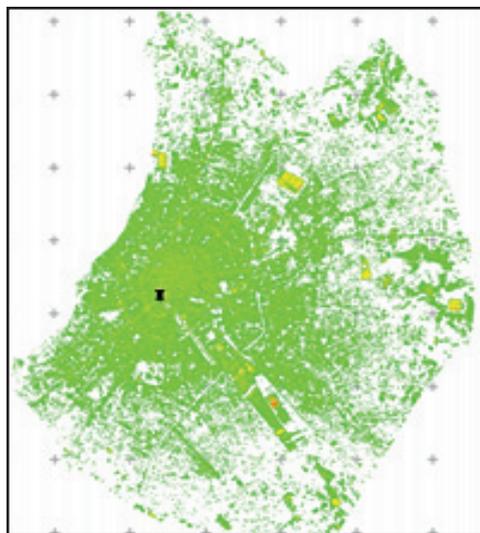


Figura 8. 31 de abril 2017

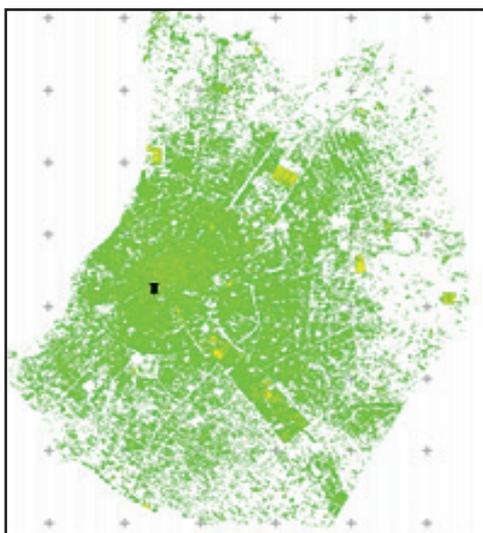


Figura 6. 23 de agosto 2020

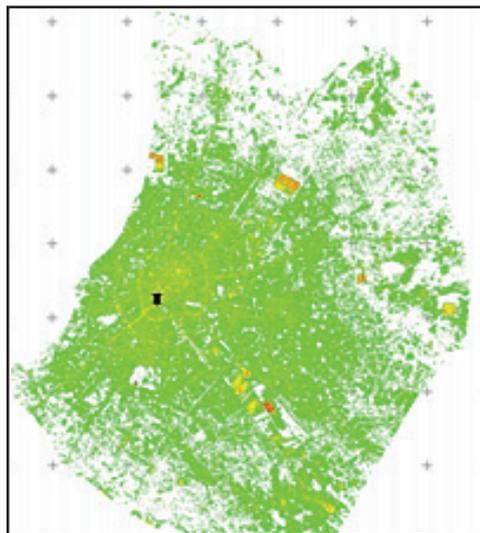


Figura 9. 18 de octubre 2017

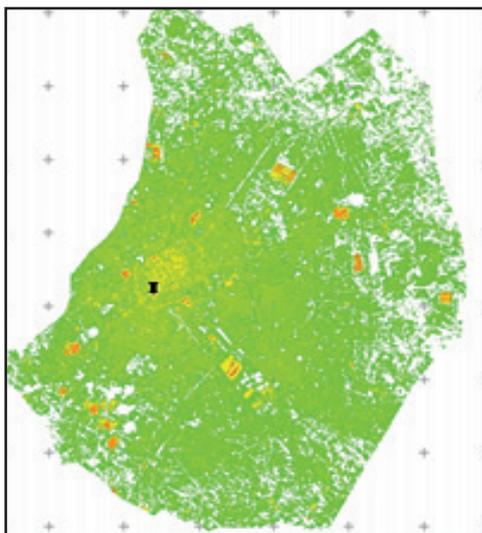


Figura 10. 22 de julio 2014

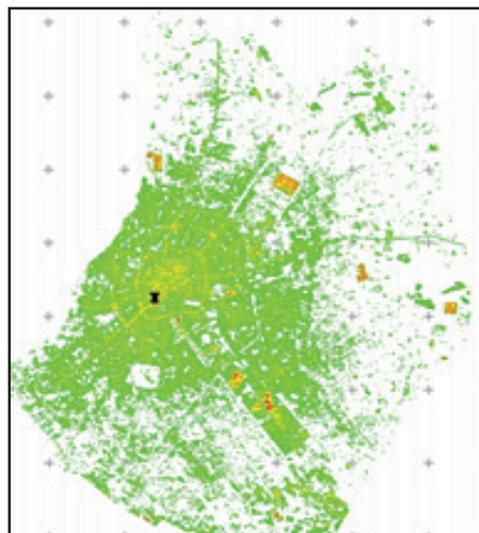


Figura 13. 26 de octubre 2014

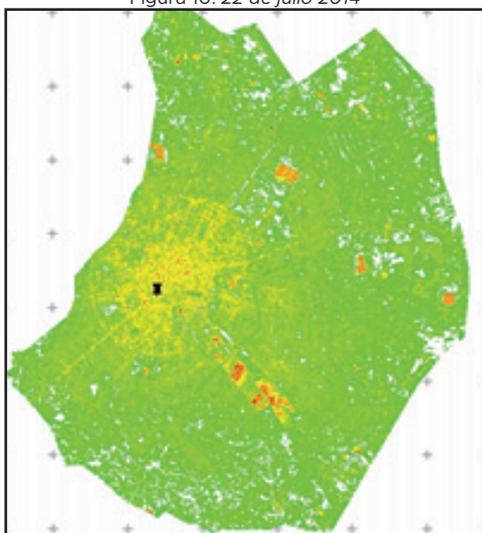


Figura 11. 23 de agosto 2014

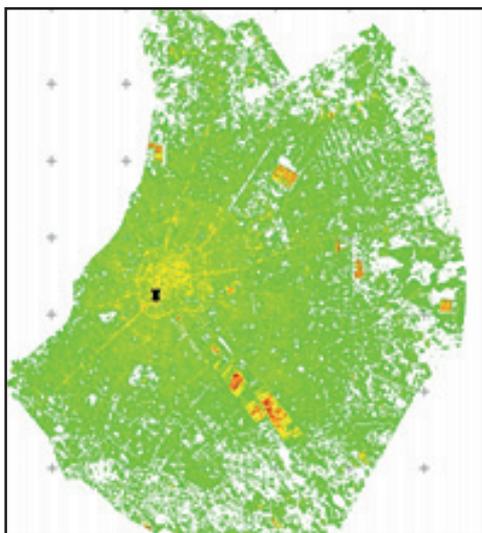


Figura 12. 8 de septiembre 2014

Concentración de PM_{10} , $\mu g/m^3$



Tabla 1. Valores estimados por el modelo vs. Valores observados por estación-

Fecha imagen	PM_{10} estimado	PM_{10} observado	Error de validación
01/04/20	21,39	8,60	12,79
17/04/20	13,50	10,50	3,00
19/05/20	14,14	15,22	1,08
07/08/20	23,30	24,02	0,72
23/08/20	7,50	10,10	2,60
14/07/17	27,10	24,50	2,60
31/08/17	19,65	20,17	0,52
18/10/17	26,17	20,49	5,68
22/07/14	24,76	18,50	6,26
23/08/14	28,71	28,74	0,03
08/09/14	27,17	42,40	15,28
26/10/14	23,93	21,60	2,33

DISCUSIÓN

Los modelos que cumplieron esta condición fueron dos. Estos tienen en común las bandas 1, 2, 4 y 5 (Aerosol, Blue, Red y NIR respectivamente). Presentaron coeficientes de determinación por encima de 0,5 y un RMSE entre 5,99 a 6,02. Sin embargo, a la hora de aplicar los modelos a la imagen satelital los valores predichos no eran consistentes. Si bien el valor predicho de PM_{10} en el área de la estación era cercano al valor observado por la estación, el resto del área urbana presentaba valores extremos por encima $100 \mu g/m^3$. También se presentaban valores negativos dentro del área urbana intensiva y áreas como el Parque Industrial y San Aurelio presentaban valores bajos o negativos de PM_{10} así como áreas verdes presentaban valores altos en comparación a zonas con alta urbanización. Se procedió a construir una base de datos utilizando los valores calculados de reflectancia TOA para las bandas 1 a 7 además de utilizar los valores digitales de las bandas térmicas del sensor TIRS. No se utilizaron los valores de reflectancia de superficie. Se escogieron las bandas mencionadas de acuerdo a la bibliografía consultada.

Se utilizó la imagen del 1 de abril del 2020 para realizar la validación de acuerdo a la metodología mencionada. También se tomó en cuenta que los valores predichos mostraran consistencia, es decir, en zonas de alta urbanización se presentarían valores de PM_{10} mayores a las áreas verdes. Además, se tomaron en cuenta los valores de PM_{10} obtenidos en áreas como Parque Industrial y San Aurelio para confirmar que el modelo presenta valores congruentes. El mejor modelo hace uso de las variables correspondientes a la banda 5 y banda 10, presenta un RMSE de 5,5 y un R^2 de 0.6. El p-valor se encuentra por debajo de 0,05 y ambas variables se consideran significativas.

Por lo tanto, el modelo propuesto para la estimación de PM_{10} es el siguiente:

Modelo propuesto Ecuación 4.

$$PM_{10}(\mu g/m^3) = -214.1 * TOAB5 + 0.005314 * DNB10 - 98.87 \quad (4)$$

Este modelo presentó un coeficiente de determinación R^2 apropiado comparado con otros estudios en que los valores de R^2 están entre 0,5 y 0,9 (Alvarez & Padilla, 2014), (Abad, 2016), (Castro, 2019). También es importante recalcar que (Chang & Hanna, 2004) establecieron que para que un modelo de calidad del aire sea considerado bueno, el coeficiente de determinación debe estar entre 0,5 y 0,9. Por lo tanto, el coeficiente de determinación obtenido en el modelo propuesto concuerda con los autores mencionados y se considera adecuado. Es importante mencionar que la generación del modelo se vio limitada por la resolución temporal de las imágenes Landsat 8 y la baja cantidad de observaciones, por lo que el R^2 podría aumentar

significativamente empleando más imágenes y observaciones.

Los mapas temáticos generados aplicando el modelo propuesto presentan valores consistentes. En todos los casos, se observa que las áreas que presentan un alto nivel de urbanización muestran valores altos en comparación a los valores de áreas verdes o áreas con menos urbanización. El área urbana intensiva presenta valores de PM entre 10 a $30 \mu g/m^3$. En algunas áreas presentan valores por encima de los $30 \mu g/m^3$. Mientras que en áreas verdes se observan valores de PM_{10} por debajo de los $10 \mu g/m^3$. Se utilizó el color blanco para identificar y diferenciar los valores negativos. Estos valores se presentan generalmente en áreas verdes y en la periferia del área urbana de Santa Cruz de la Sierra. También se observa que áreas como el Parque Industrial y la zona de San Aurelio presentan valores muy altos en comparación al área intensiva urbana y áreas verdes, presentan valores entre 40 a $60 \mu g/m^3$. Se observa que el uso de valores de reflectancia TOA junto con el uso de bandas térmicas de Landsat 8 mejoran el modelo de estimación de PM_{10} y presentan valores más congruentes con la realidad.

Para el caso de las imágenes del 1 de abril del 2020 y 8 de septiembre del 2014 se observa una diferencia mayor que en las otras estaciones. Esto puede ser debido a que en ambas fechas se observaron valores extremos de PM_{10} (8,6 y 42,4 respectivamente).

Se obtuvieron los datos observados por la estación automática Ex Terminal durante los años 2014, 2017 y 2020. Se adquirieron en total 12 imágenes satelitales, recuperadas en path 231 y row 72, del visor de la USGS. Estas imágenes cumplieron con la condición establecida de presentar un porcentaje de nubosidad por debajo del 25 %. El porcentaje de nubosidad va desde 0.36% hasta 21,96 %. Se realizó el procesamiento a cada una de las imágenes, obteniéndose los valores de reflectancia en el techo de la atmosférica y reflectancia de superficie. Con estos valores se calculó el valor de reflectancia atmosférica del pixel que representa la superficie donde se encuentra ubicada la estación. Se desarrolló el modelo para estimar la concentración de PM_{10} . Este modelo presentó un coeficiente de determinación R^2 de 0,587 y un RMSE de 5,5. El mejor modelo hace uso de las bandas 5 y 10. El modelo propuesto se considera apropiado ya que el valor de R^2 se encuentra entre el rango establecido por los autores consultados para la realización de este trabajo.

Se realizó el monitoreo de la contaminación atmosférica por PM_{10} para el área de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra. Se generaron 12 mapas temáticos, aplicando el modelo propuesto a cada una de las imágenes satelitales adquiridas. Los valores predichos por el modelo son consistentes. Las áreas verdes presentan valores bajos en comparación a las áreas con alto nivel de urbanización. Áreas como Parque Industrial y San Aurelio presentan valores altos, por lo que se considera que el modelo arroja valores congruentes.

REFERENCIAS

- Abad, L. C. (2016). "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". Cuenca, Ecuador.
- Alvarez, C. I., & Padilla, O. (2014). ESTIMACIÓN DE CONTAMINACIÓN DEL AIRE POR PM_{10} EN QUITO DETERMINADO POR INDICES AMBIENTALES OBTENIDOS CON IMÁGENES SATELITALES LANDSAT ETM+. Sangolqui, Ecuador.
- Castro, G. (2019). Metodología para determinar la cantidad de material particulado en la capa troposfera a partir de teledetección. Área de estudio: Valle de Aburra, Antioquia, para el año 2016. (Trabajo de Investigación Aplicada). Universidad Católica de Manizales, Manizales.
- Chang, J., & Hanna, S. R. (2 de June de 2004). Air quality model performance evaluation. *Meteorology and Atmospheric Physics*. doi:10.1007/s00703-003-0070-7 73 - 78
- Grosso, N., Ferreira, F., & Mesquita, S. (2007). Improvement in particles (PM_{10}) urban air quality mapping interpolation using remote sensing data. En *Air Pollution Modeling and Its Application* (Vol. 6, págs. 265-274). doi:https://doi.org/10.1016/S1474-8177(07)06031-7
- Hameed, S. A., & Hasan, G. (2014). Estimation of PM_{10} Concentration using Ground Measurements and Landsat 8. *Journal of Remote Sensing & GIS*, 1-6. doi:10.4172/2169-0049.1000120
- Red de Monitoreo de la Calidad del Aire. (2011). Informe de la Red MonICA de Santa Cruz de la Sierra. Santa Cruz de la Sierra. Recuperado el Julio de 2020, de https://issuu.com/upsasantacruzbolivia/docs/informe_presentacion_red_monica_a_201
- Red de Monitoreo de la Calidad del Aire. (2016). Informe Nacional de Calidad de Aire de Bolivia - 2015.
- Saraswat, I., Mishra, R. K., & Kumar, A. (2017). Estimation of PM_{10} concentration from Landsat 8 OLI satellite imagery over Delhi, India. En *Remote Sensing Applications: Society and Environment* (Vol. 8, págs. 251-257). doi:https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.10.006
- Vásquez, R., & Vargas, I. (Diciembre de 2016). Manual Técnico: Diseño, Implementación y Operación de Redes de Monitoreo de Calidad del Aire para ciudades de Bolivia. Segunda. (P. A. Limpio, Ed.)

CITA

