

Concentración de Material Particulado $PM_{2,5}$ en Función de la Humedad y Reflectancia Atmosférica Usando Imágenes Landsat-8 en Lima Metropolitana, 2015 – 2016

Concentration of Particulate Material $PM_{2,5}$ as a Function of Moisture and Atmospheric Reflectance Using Landsat-8 Images in Lima Metropolitana, 2015 – 2016

Cecilia García¹

RESUMEN

El trabajo consiste en encontrar el modelo matemático que estime la concentración de material particulado $PM_{2,5}$ en función de la humedad y la reflectancia atmosférica de imágenes satelitales Landsat 8 en Lima Metropolitana para los años 2015 y 2016. Se descargaron 19 imágenes satelitales Landsat 8 desde United State Geological Survey (USGS) en el Path 7 y Row 68 para los años 2015 y 2016, con la menor cobertura nubosa. La humedad se obtuvo del Índice Normalizado de la Diferencia de Humedad (NDMI) y la concentración de $PM_{2,5}$ se obtuvo de siete estaciones fijas de monitoreo ubicadas en Lima Metropolitana administradas por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). El modelo matemático encontrado presentó una alta correlación entre la concentración de $PM_{2,5}$ medida en estaciones terrestres, la humedad y la reflectancia atmosférica calculada de las imágenes satelitales.

Palabras clave: Material particulado, $PM_{2,5}$, contaminación, NDMI, humedad, reflectancia.

ABSTRACT

The work consists of finding the mathematical model that estimates the concentration of $PM_{2.5}$ particulate matter as a function of humidity and atmospheric reflectance of Landsat 8 satellite images in Metropolitan Lima for the years 2015 and 2016. The Landsat 8 satellite images were downloaded from the United State Geological Survey (USGS) in Path 7 and Row 68 obtaining a total of 19 images of the year 2015 and 2016, with the lowest coverage cloudy. The moisture was obtained by calculating the Normalized Difference Moisture Index (NDMI). The concentration of $PM_{2.5}$ was obtained from seven fixed monitoring stations located in Metropolitan Lima administered by the National Service of Meteorology and Hydrology of Peru (SENAMHI). The mathematical model found showed a high correlation between the concentration of $PM_{2.5}$ measured in ground stations, the humidity and the atmospheric reflectance calculated from the satellite images.

Keywords: Particulate material, $PM_{2,5}$, contamination, NDMI, moisture, reflectance.

¹Universidad Nacional José María Arguedas. Andahuaylas. Apurímac. Perú.

INTRODUCCIÓN

Según la OMS, en el año 2012, la contaminación del aire provocó siete millones de muertes en el mundo. Las muertes prematuras se duplicaron por exposición a contaminación del aire con respecto a estimaciones anteriores, cerca del 88% de las muertes por contaminación de aire ocurrieron en países de ingresos bajos y medianos (países de las regiones de Asia Sudoriental y Pacífico Occidental) que representan el 82% de la población mundial (World Health Organization, 2015a; OMS, 2014a; OMS, 2014b).

En América Latina y el Caribe, se calcula que anualmente ocurren unas 133.000 muertes prematuras asociadas a niveles insatisfactorios de calidad del aire (Organización Panamericana de la Salud, 2013). Estas cifras confirman que la contaminación del aire representa una amenaza importante para la salud mundial. Las alteraciones climáticas que está sufriendo nuestro planeta como: sequías prolongadas, lluvias intensas y nevadas severas, son manifestaciones de la presencia de los contaminantes en el aire (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2011).

El material particulado PM_{2,5}, o “material particulado fino” como también se le conoce, ha sido objeto de cuantiosas investigaciones debido a los síntomas indeseables que provoca en la salud humana y por su contribución al cambio climático (World Health Organization, 2013). La característica de su tamaño aerodinámico (menor o igual a 2,5 μm) y composición tóxica le otorga la capacidad de penetrar en áreas muy profundas del sistema respiratorio y circulatorio; por ello la exposición a este contaminante está asociado a las altas tasas de mortalidad y morbilidad, tal como lo evidencian diversos estudios en varios países del mundo (Raaschou-Nielsen *et al.*, 2016; World Health Organization, 2013). La OMS ha establecido el nivel de concentración máximos permisible de emisiones de PM_{2,5} (media en 24 h) de 25 μg/m³, es

recomendable no exceder para evitar riesgos a la salud humana como mortalidad total, enfermedades cardiopulmonares y cáncer al pulmón, sobre todo en grupos de personas vulnerables como niños, ancianos y mujeres embarazadas (OMS, 2006); el Perú reconoce estos estándares en su legislación ambiental (Ministerio del Ambiente, 2011).

Existen diversos tipos de instrumentos que miden los contaminantes del aire, principalmente desde estaciones fijas de monitoreo terrestre. Por su tecnología, son muy caros; por tanto, su disponibilidad está restringida al número de estaciones en cada área. Su rango de observación efectiva está condicionado por la ubicación fija de los instrumentos (Li and Hou, 2015), además de no ser muy prácticos si las mediciones se realizan en grandes extensiones o para el monitoreo continuo de los mismos (Hameed and Hasan, 2014; Martinez, 2015).

Considerando que las concentraciones de PM_{2,5} son muy variables en el espacio, las mediciones desde estaciones fijas son insuficientes para proporcionar información valiosa de distribución espacial y temporal de dicho contaminante a una escala urbana, regional o global (Chen *et al.*, 2014), por lo que el monitoreo de los contaminantes del aire en dichas escalas, usualmente se realiza combinando datos de mediciones de estaciones fijas con la estimación del modelo de regresión resultante para dicha concentración del contaminante entre los puntos de monitoreo (Nadzri *et al.*, 2010), en función de sus variables explicativas.

Actualmente, los métodos de monitoreo de contaminantes del aire incluyen mediciones satelitales de teledetección y mediciones tomadas desde estaciones fijas. Las mediciones satelitales de contaminantes del aire proporcionan una representación gráfica completa, alta resolución espacial y una amplia cobertura espacial (Li and Hou, 2015),

incluyendo la identificación de fuentes contaminantes (World Health Organization, 2015a). Aunque las mediciones satelitales son menos precisas que las mediciones realizadas desde estaciones fijas en tierra, claramente tiene la ventaja de proporcionar una amplia cobertura espacial en períodos cortos de repetición, mejoran la comprensión de la distribución del contaminante sobre un amplio dominio espacial y a altitudes variadas (Hameed and Hasan, 2014) por lo que se considera complementario a las mediciones realizadas en estaciones fijas (Li and Hou, 2015).

Diversos estudios han demostrado que existe correlación entre la concentración de material particulado y la reflectancia atmosférica de las imágenes satelitales. Hameed y Hasan (2014) y Nadzri *et al.* (2010) encontraron una relación lineal entre la concentración de material particulado y la reflectancia derivada de las imágenes satelitales; mientras que Chen *et al.* (2014) trabajando con un modelo de regresión lineal múltiple para la concentración de material particulado en función de la temperatura de la superficie de la tierra, humedad del aire (TVDI) y la reflectancia de la imagen satelital MODIS, encontró que las variables humedad del aire y la reflectancia de la imagen satelital resultaron ser significativas. Sin embargo, la discusión se centra en cómo establecer el modelo de regresión entre la concentración de PM_{2.5} obtenido de estaciones fijas de monitoreo terrestre y la reflectancia atmosférica en la que se obtenga coeficientes de regresión y correlación significativos (Li and Hou, 2015; Hameed y Hasan, 2014; Chen *et al.*, 2014).

Lima Metropolitana cuenta con una red de monitoreo de calidad de aire compuesta por diez estaciones fijas que monitorean la calidad del aire, que incluyen mediciones de NO₂, SO₂, PM₁₀, PM_{2.5}, O₃ y CO. Sin embargo, se obtiene información de los contaminantes sólo en los puntos donde se encuentran dichas estaciones fijas de monitoreo terrestre, dejando

información vacía en aquellas ciudades donde no se cuenta con dichas estaciones. Esto limita la cobertura de distribución espacial del monitoreo del contaminante restringiendo la posibilidad de estudiar con mayor detalle sus efectos en la salud pública (Kumar, Chu and Foster, 2008).

Es importante monitorear la concentración de PM_{2.5} y visualizar su distribución espacial y temporal en Lima Metropolitana porque permite conocer con mayor detalle aquellas zonas o distritos donde se tiene niveles elevados de concentración del contaminante que constituirá una herramienta importante para los tomadores de decisiones en salud pública. Los riesgos a la salud derivados de exposiciones a concentraciones de PM_{2.5} en el largo plazo (meses/años) son mucho mayores que una exposición en el corto plazo (horas/días) e incluso supone riesgos mayores que el efecto acumulativo de exposiciones en el corto plazo (World Health Organization, 2015b).

Chen *et al.* (2014) en una investigación realizada en China, encontraron una alta correlación ($r=0,863$) y un coeficiente de determinación $R^2=0,7451$, de la concentración del PM_{2.5}, humedad del aire y la reflectancia atmosférica, de los datos obtenidos de las imágenes satelitales MODIS y una aplicación de un modelo de regresión lineal múltiple.

Nadzri *et al.* (2010) aplicando un modelo de regresión lineal simple para la concentración de PM₁₀ en función de la reflectancia atmosférica de las imágenes en regiones áridas usando imágenes satelitales Landsat 7 ETM de estaciones fijas, encontró una alta correlación $r=0,942$ entre dichas variables y un coeficiente de determinación de $R^2=0,888$. De acuerdo a Hameed y Hasan (2014), el modelo de regresión más usado es el de regresión lineal simple en el que se relaciona el PM_{2.5} y la reflectancia atmosférica en diferentes bandas de la imagen satelital.

La Dirección General de Salud Ambiental del Ministerio del Ambiente realizó un estudio de

saturación de Lima Metropolitana en el 2011 obtuvieron la distribución espacial de los contaminantes y la identificación de los distritos con altos índices de contaminación del aire (SO_2 , NO_2 , O_3 , C_6H_6 , Pb, PM_{10} y $PM_{2.5}$). El área de estudio comprendió 32 distritos representativos de Lima Metropolitana y Callao dividido en cinco grupos: Lima Sur, Lima Este, Lima Centro, Lima Norte y Callao. Para la obtención de los datos de contaminación del aire se instaló 50 estaciones de monitoreo con métodos activo y pasivo en dos temporadas del año: verano (en los meses de febrero y marzo) e invierno (de julio a setiembre). Los análisis de laboratorio de las partículas se llevaron a cabo en la DIGESA y los gases en los Laboratorios de Suiza.

El presente estudio tiene por objetivo estimar la concentración de $PM_{2.5}$ en función de la humedad del aire y la reflectancia atmosférica usando imágenes satelitales Landsat-8 en Lima Metropolitana aplicando un modelo de regresión lineal múltiple. Se consideró como área de trabajo Lima Metropolitana ya que esta región cuenta con mediciones climáticas y meteorológicas derivadas de diez estaciones fijas de monitoreo con las cuales se podrá estimar la concentración de $PM_{2.5}$.

El hecho de obtener un modelo de regresión lineal múltiple que estima la concentración de $PM_{2.5}$ en función de la humedad y la reflectancia atmosférica usando imágenes satelitales Landsat-8 en Lima Metropolitana, da la posibilidad de estimar la concentración de dicho contaminante en otras zonas urbanas con características similares. Además, es importante el uso de la tecnología satelital ya que permite estimar la concentración de $PM_{2.5}$ con menor inversión de costo, tiempo y personal ya que no implica contar con numerosas estaciones fijas para este propósito.

A raíz de la problemática expuesta se plantea la siguiente pregunta: ¿Cuál es el modelo estimación de concentración de Material Particulado $PM_{2.5}$ en función de la humedad y la

reflectancia atmosférica usando imágenes satelitales Landsat-8 en Lima Metropolitana, da la posibilidad de estimar la concentración de dicho contaminante en otras zonas urbanas con características similares. Además, es importante el uso de la tecnología satelital ya que permite estimar la concentración de $PM_{2.5}$ con menor inversión de costo, tiempo y personal ya que no implica contar con numerosas estaciones fijas para este propósito.

A raíz de la problemática expuesta se plantea la siguiente pregunta: ¿Cuál es el modelo estimación de concentración de Material Particulado $PM_{2.5}$ en función de la humedad y la reflectancia atmosférica usando imágenes satelitales Landsat-8 en Lima Metropolitana durante el año 2015 y 2016?

Finalmente, el propósito de esta investigación es determinar el modelo de estimación de la concentración de Material Particulado $PM_{2.5}$ en función de la humedad y la reflectancia atmosférica usando imágenes satelitales Landsat-8 en Lima Metropolitana durante el año 2015 y 2016.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

Lima Metropolitana es el área metropolitana conformada por la conurbación integrada por los centros urbanos de las provincias de Lima y es el área metropolitana más grande, extensa y poblada del Perú. El área urbana es una de las mayores a nivel latinoamericano, con 9.903.935 habitantes (2015), lo que equivale a alrededor del 32% del total nacional (figura 1).



Figura 1. Lima Metropolitana señalada en el rectángulo rosado dentro área de path 7 row 68 (USGS - <http://earthexplorer.usgs.gov/>)

Objeto de estudio

La concentración de PM_{2,5} (media en 24 h), índice normalizado de la diferencia de humedad (NDMI) y reflectancia atmosférica de una imagen Landsat-8.

Población y Muestra

La población son todas las concentraciones de PM_{2,5} obtenidas de las estaciones fijas de monitoreo, así como los valores de humedad obtenidos con el índice normalizado de la diferencia de humedad (NDMI) y reflectancia atmosférica obtenidos de las imágenes satelitales Landsat-8 de Lima Metropolitana de los años 2015 y 2016.

Muestra: son las concentraciones de PM_{2,5} obtenidas de siete estaciones fijas de monitoreo, así como el índice normalizado de la diferencia de humedad (NDMI) y reflectancia atmosférica de 19 imágenes satelitales Landsat-8 de Lima Metropolitana de los años 2015 y 2016, detallándose como sigue:

a) La Concentración de PM_{2,5} (media en 24 h) obtenida de las estaciones fijas de monitoreo del SENAMHI durante los años 2015 y 2016. Los datos provienen de siete estaciones fijas que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Ubicación geográfica de estaciones fijas de monitoreo de calidad del aire en Lima Metropolitana.

Código	Descripción		GMS	
	Distrito	Lugar	Latitud	Longitud
E1	Carabayllo	Piscina Municipal de Carabayllo	11°54' "S"	77° 02' "W"
E2	San Juan de Lurigancho	Universidad César Vallejo	12°01' "S"	76° 59' "W"
E3	Santa Anita	Municipalidad de Santa Anita	12°02' "S"	76° 58' "W"
E4	Huachipa	Municipalidad de Huachipa	12°01' "S"	76° 56' "W"
E5	Ate	Municipalidad de Ate	12°01' "S"	76° 55' "W"
E6	Jesús María	Campo de Marte	12°04' "S"	77° 02' "W"
E7	San Borja	Polideportivo Limatambo	12°06' "S"	77° 00' "W"

b) La reflectancia atmosférica se ha obtenido de las 19 imágenes satelitales Landsat-8 de Lima Metropolitana que corresponden a 12 imágenes del año 2015 y siete imágenes del año en cada banda visible (Banda1, Banda 2, Banda 3 y Banda 4), así como el índice normalizado de la

diferencia de humedad (NDMI) en las siete estaciones fijas de monitoreo. La selección de la muestra se realizó de forma deliberada ya que se seleccionaron aquellas imágenes que presentaron la menor cobertura nubosa posible y temporalidad uniforme.

Mediciones de PM_{2,5}

La concentración de PM_{2,5} fue recolectada desde siete estaciones fijas de monitoreo administradas por el SENAMHI (figura 2 y tabla 1).

De cada imagen Landsat 8, se obtuvo la reflectancia atmosférica con corrección angular para cada banda visible (Banda1, Banda 2, Banda 3 y Banda 4), teniendo un total de 133 datos. Es preciso indicar que, la muestra se seleccionó de forma deliberada ya que se consideró imágenes que presentaban la menor cobertura nubosa posible y temporalidad uniforme. Asimismo, se obtuvo el índice normalizado de la diferencia de humedad (NDMI) como la diferencia normalizada entre el Infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo medio (SWIR1, banda 6).

Variables de estudio

Se tienen las siguientes variables:

Variable1: Concentración de PM_{2,5} (media en 24h)

Variable2: Humedad (NDMI)

Variable3: RB1, RB2, RB3, RB4



Figura 2. Estaciones fijas de monitoreo en Lima Metropolitana.

Donde:

RAB_i, es la reflectancia atmosférica de la imagen satelital Landsat 8 en cada banda visible B_i de la imagen satelital (Banda 1: Aerosol costero, Banda 2: Azul, Banda 3: Verde y Banda 4: Rojo).

NDMI: es el índice normalizado de la diferencia de humedad.

Métodos y técnicas

Para estimar la concentración de PM_{2,5} en función de la humedad y reflectancia atmosférica usando imágenes satelitales Landsat-8 en Lima Metropolitana, se utilizó la siguiente función:

$$PM_{2,5} = f(RB1, RB2, RB3, RB4, NDMI) \tag{1}$$

Los parámetros de la ecuación (1) se estimaron aplicando el modelo de regresión lineal múltiple.

Para tal efecto se ha utilizado lo siguiente:

Formato de recolección de imágenes satelitales Landsat 8 de los años 2015 y 2016.

- Imágenes satelitales Landsat-8 de Lima Metropolitana obtenidas de la Base de Datos de United States Geological Survey (USGS - <http://earthexplorer.usgs.gov/>) que reporta el satélite Landsat 8.
- Formato de recolección de datos de PM_{2,5}, humedad y reflectancia atmosférica para cada una de las bandas visibles de cada una de las imágenes Landsat 8.

El procedimiento a seguir fue el siguiente:

- Se recolectó 19 imágenes satelitales con la menor cobertura nubosa posible y temporalidad uniforme de Lima Metropolitana de los años 2015 y 2016. Se halló la reflectancia atmosférica (TOA) de las 19 imágenes satelitales, utilizando los coeficientes de reflectancia reescalados, obtenidos del archivo de metadatos MTL de cada imagen satelital obtenido por el sensor OLI (USGS, 2017). Se empleó la siguiente ecuación para calcular los niveles digitales (ND) a valores de reflectancia:

$$P \lambda' = M \rho Q_{cal} + A \rho \tag{2}$$

Donde:

Pλ' = Es el valor de reflectancia planetaria, sin corrección por ángulo solar.

M_p = Es el factor multiplicativo de escalado específico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de la banda).

A_p = Es el factor aditivo de escalado específico por banda obtenido del metadato (REFLECTANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de la banda).

Q_{cal} = Es el producto estándar cuantificado y calibrado para valores de pixel (DN). Este valor se refiere a cada una de las bandas de la imagen.

Tabla 2. Metadatos de imágenes satelitales Landsat 8 de Lima Metropolitana durante los años 2015-2016.

N°	Año	ID Scene	Sensor Identifier	Date Acquired	Image Quality	Scene Cloud Cover	Sin Elevation	Sin Azimuth
1	2015	LC08070822015029LGN01	OLI_TIRS	29/01/2015	9	50,79	585,821,361	1,054,798
2	2015	LC08070822015046LGN01	OLI_TIRS	14/02/2015	9	61,25	5886,629,604	980,246
3	2015	LC08070822015109LGN01	OLI_TIRS	19/04/2015	9	27,15	5,362,120,006	522,466
4	2015	LC08070822015123LGN00	OLI_TIRS	5/05/2015	9	31,01	5,073,153,086	453,822

Considerando que la reflectancia real de una imagen captada por un sensor espacial está condicionado por el comportamiento de la atmósfera y el ángulo de observación, se requiere una corrección de dichas imágenes para el ángulo solar aplicando la siguiente fórmula (USGS, 2017):

$$P_{\lambda} = P_{\lambda'} / \sin(\theta_{SE}) \tag{3}$$

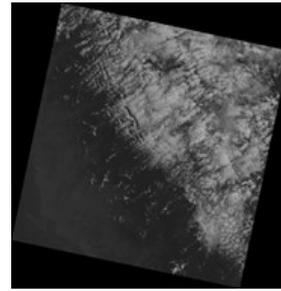
Donde: P_{λ} es la reflectancia planetaria sin corrección por ángulo solar y θ_{SE} es el ángulo de elevación solar.

- Para obtener la humedad se calculó el índice normalizado de la diferencia de humedad (NDMI, como la diferencia normalizada entre el Infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo medio (SWIR1, banda 6) aplicando la siguiente fórmula (USGS, 2017):

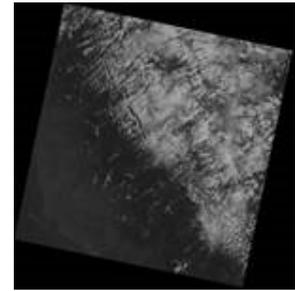
$$NDMI = (NIR - SWIR1) / (NIR + SWIR1) \tag{4}$$

Donde: NIR (Infrarrojo cercano) corresponde a la banda 5 y SWIR1 (Infrarrojo de onda corta 1) corresponde a la banda 6.

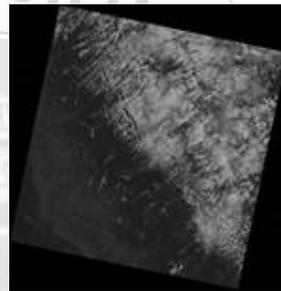
- Se realizó el análisis de coeficiente de correlación lineal entre la concentración de PM_{2.5}, la reflectancia atmosférica y humedad.



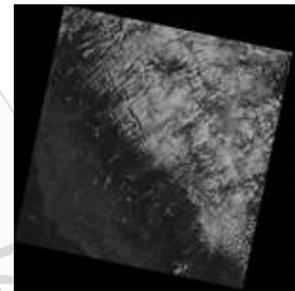
Banda 1: Aerosol
costero



Banda 2: Azul



Banda 3: Verde



Banda 4: Rojo

Figura 3. Bandas 1, 2, 3 y 4 de imagen satelital Landsat 8 del 05 abril 2016 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La relación entre reflectancia atmosférica para las bandas 1, 2, 3 y 4 y la humedad medido con el índice normalizado de diferencia de humedad (NDMI) en imágenes Landsat 8 con las concentraciones de PM_{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) obtenido de las siete estaciones fijas de monitoreo se ha estudiado mediante el análisis de correlación, teniendo los resultados en la Tabla 3. Dicho análisis demostró que hay una alta correlación entre los valores de reflectancia de la banda 3 (Verde; 0,53-0,59 μm) y el NDMI (RB3 + H) con las concentraciones de PM_{2.5} obtenidas de las siete estaciones fijas de monitoreo (Hameed y Hasan, 2014; Nadzri *et al.*, 2010; Ariza, 2013).

Tabla 3. Análisis de correlación entre la concentración de PM_{2.5} tomada de estaciones fijas de monitoreo y la reflectancia atmosférica y humedad de las imágenes Landsat 8.

Bandas PM_{2,5}	
RB1 + H	0,765
RB2 + H	0,773
RB3 + H	0,804
RB4 + H	0,79

* RB1, RB2, RB3 y RB4 es la reflectancia atmosférica en las bandas 1, 2, 3 y 4; H es la humedad medida con el NDMI.

Luego, se realizó el análisis de regresión R y el cálculo del error cuadrático medio (RMSE) de los valores de reflectancia para las bandas 1, 2, 3 y 4 y el NDMI con las mediciones de concentración de PM_{2,5} tomadas de estaciones fijas de monitoreo. Se obtuvieron varios modelos matemáticos para correlacionar la reflectancia atmosférica y el NDMI con la concentración de PM_{2,5} (Chen *et al.*, 2014; Li and Hou, 2015).

La Tabla 4 muestra estos resultados para calcular PM_{2,5} a partir de los valores de reflectancia atmosférica para imágenes Landsat 8 en la combinación de bandas RB1, RB2, RB3 y RB4 y el NDMI (humedad). Considerando que el modelo más eficiente es que tiene el coeficiente de correlación más alto (R) y el valor del error cuadrático medio (RMSE) más bajo (Hameed y Hasan, 2014; Nadzri *et al.*, 2010) se seleccionó el modelo matemático número 13 de la tabla 4, debido a que tiene el coeficiente de correlación (R) más alto: 0,847 y el RMSE más bajo: 11,893.

Tabla 4. Resultados de regresión R y RSME usando diferentes modelos matemáticos.

Nº	Modelo matemático	R	RMSE (µg/m ³)
1	PM _{2,5} = 2,34 RB1 + 1,32 H - 2,134	0,765	13,21
2	PM _{2,5} = 2,05 RB2 + 2,35 H - 3,572	0,773	17,352
3	PM _{2,5} = 1,96 RB3 + 1,48 H - 15,391	0,804	19,834
4	PM _{2,5} = 1,59 RB4 + 3,29 H - 12,075	0,79	18,427

Los estudios de Hameed y Hasan (2014) y Nadzri *et al.* (2010), demostraron que hay una correlación lineal entre la concentración de

atmosférica de las imágenes satelitales Landsat 8 OLI y Landsat 7 ETM+. En el presente estudio se demostró que existe dicha correlación entre el PM_{2.5} y la reflectancia atmosférica de las imágenes satelitales Landsat 8 OLI.

Chen *at al.* (2014) aplicaron un modelo de regresión lineal múltiple para la concentración de material particulado en función de la temperatura de la superficie de la tierra, humedad del aire (TVDI) y la reflectancia de la imagen satelital MODIS, encontrando que las variables humedad del aire y la reflectancia de la imagen satelital resultaron ser significativas. De la misma manera, este estudio demostró que existe un alto coeficiente de correlación (R) y el más bajo error medio cuadrático (RMSE) aunque tratándose de imágenes Landsat 8 OLI y no MODIS.

El modelo matemático encontrado (número 13) es beneficioso para calcular la concentración de PM_{2,5} a partir de los valores de reflectancia atmosférica de las bandas visibles Landsat 8 y el NDMI. Aunque estas mediciones son menos precisas que las mediciones realizadas en estaciones fijas, claramente tiene la ventaja de ser el único conjunto de mediciones que proporcionan una amplia cobertura espacial en períodos cortos de repetición, que mejoran la comprensión de la distribución del contaminante sobre un amplio dominio espacial y a altitudes variadas (Hameed and Hasan, 2014) por esto se considera complementario a las mediciones realizadas en estaciones fijas (Li and Hou, 2015).

CONCLUSIONES

Las imágenes satelitales Landsat 8 OLI se utilizaron con éxito para calcular la concentración de PM_{2,5} en Lima Metropolitana. El modelo matemático propuesto de cálculo de la concentración de PM_{2,5} se basa en el modelo de reflectancia atmosférica (TOA – en el techo de la atmósfera) con corrección angular. El resultado indica que el modelo puede calcular la concentración de contaminación del aire PM_{2,5}

con un alto grado de precisión utilizando el valor de reflectancia de las bandas visibles de la imagen Landsat 8 OLI y la humedad medido con el índice normalizado de diferencia de humedad (NDMI).

Se encontró correlación entre la medición de concentración de PM_{2.5} tomado de estaciones fijas de monitoreo, la humedad con el índice normalizado de diferencia de humedad y la concentración de PM_{2.5} calculado. El modelo matemático presentó una alta correlación entre la concentración de PM_{2.5} medida, la humedad y la concentración de PM_{2.5} calculado. Asimismo, el estudio demostró la eficacia del modelo de estimación de concentración de PM_{2.5} basada en las bandas visibles de la imagen del satélite Landsat 8 OLI y la humedad en Lima Metropolitana.

Estos resultados indican que la concentración de PM_{2.5} puede ser mapeada utilizando información de satélite para proporcionar un área de cobertura mayor.

BIBLIOGRAFÍA

- Ariza, A. 2013. "Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission)". Centro de Investigación y Desarrollo en información Geográfica del IGAC -CIAF: 46.
- Brizuela, A.; Aguirre, C.; Velasco, I. 2007. "Aplicación de Métodos de Corrección Atmosférica de Datos Landsat 5 Para Análisis Multitemporal". *Remote Sensing of Environment*: 207–14. Recuperado de: <http://www.aet.org.es/congresos/xii/arg27.pdf>.
- Chen, Y.; Han, W.; Chen, S.; Tong, L. 2014. "Estimating Ground-Level PM_{2.5} Concentration Using Landsat 8 in Chengdu, China". In *Proceedings of Spie - The International Society for Optical Engineering*, ed. Eastwood Im. *Remote Sensing of the Atmosphere, Clouds, and Precipitation V*, 925917–31. Recuperado de: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.2068886>.
- Chuvienco, E. 1995. *Fundamentos de Teledetección Espacial*. 2da Ed. Madrid, España: Ediciones Rialp S.A.
- Coimbra, E. 2010. *Satellite Missions Table*. Course EO Satellite Missions Table. European Space Agency.
- Comisión Nacional del Agua. 2005. "Percepción Remota: Fundamentos de Teledetección Espacial". Subgerencia de Información Geográfica del Agua: p. 62.
- Digesa. 2011. *Estudio de Saturación Lima Metropolitana y Callao, Año 2011*. Lima, Perú. Recuperado de: <https://www.yumpu.com/es/document/view/13237199/ii-estudio-de-saturacion-de-la-calidad-del-aire-en-lima->
- Earth Observatory. 2015. "Changing Views of Fine Particulate Pollution." NASA. Recuperado de: http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=86075&eocon=image&eoci=related_image (February 10, 2016).
- Fernández, T.; Pinilla, C.; Ureña, M. 2007. *Teledetección*. Asignatura del Departamento de Ingeniería Cartográfica, Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Jaén. Recuperado de: <http://coello.ujaen.es/asignaturas/teledeteccion/index.htm>.
- 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. Recuperado de: <http://www.omicsgroup.org/journals/estimation-of-pm-concentration-using-ground-measurements-and-landsat-oli-satellite-image-2169-0049.1000120.php?aid=25450>.
- Instituto Científico del Pacífico. 2015.

- Introducción a La Teledetección, Manual. Lima, Perú: Curso de Teledetección con ENVI 5.1.
- Kumar, Naresh; Chu, Allen; and Foster, Andrew. 2008. "Remote Sensing of Ambient Particles in Delhi and Its Environs: Estimation and Validation". *International Journal of Remote Sensing* 29(12): pp. 3383–3405.
- Li, B.; Hou, L. 2015. "Discuss on Satellite-Based Particulate Matter Monitoring Technique". *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-7/W3(May)*: 219–23. Recuperado de : <http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-7-W3/219/2015/>.
- Lira, J. 2010. Tratamiento Digital de Imágenes Multiespectrales. 2da Ed. México, D.F.: Instituto de Geofísica, UNAM. Recuperado de : <https://books.google.com.pe/books?id=LTKMAwAAQBAJ&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>.
- Martínez, J.; Martín, P.; Díaz, J.; Muñoz, F. 2010. Red Nacional de Teledetección Ambiental Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente. Eds. Javier Martínez and Pilar Martín. Red Nacional de Teledetección Ambiental.
- Martínez, W. 2015. "Efecto de la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México sobre la respuesta espectral registrada por un sensor remoto". Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ministerio del Ambiente. 2011. "Evaluación y Fiscalización Ambiental". In *Compendio de Legislación Ambiental Peruana.*, ed. Dirección de Políticas Normas e Instrumentos de Gestión Ambiental. Ministerio del Ambiente, 1–184. Recuperado de : http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/10/compendio_08_-_evaluacion_y_fiscalizacion_ambiental_2.pdf.
- Nadzri, O.; Mohd, Z.; Mat, J.; Lim, H. 2010. "Estimating Particulate Matter Concentration over Arid Region using Satellite Remote Sensing : A Case Study in Makkah , Saudi Arabia". 4(11): pp. 131–42.
- 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. Ginebra, Suiza.
- . 2014a. "7 millones de muertes cada año debidas a la contaminación atmosférica". Comunicado de Prensa. Recuperado de : <http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/es/>.
- . 2014b. Calidad del aire (exterior) y salud. Ginebra, Suiza. Recuperado de : <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/>.
- Organización Panamericana de la Salud. 2013. Informe Regional sobre el desarrollo sostenible y la salud en las Américas. US. Washington, D.C.: Oficina Regional de la Organización Panamericana de la Salud. Recuperado de : <http://iris.paho.org/xmlui/bitstream/handle/123456789/3189/informe-reg-des-sostenible.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Raaschou-Nielsen, O. *et al.* 2016. "Particulate Matter Air Pollution Components and Risk for Lung Cancer". *Environment International* 87(February): pp. 66–73.
- Sbarato, V. *et al.* 1997. "Análisis y caracterización del Material Particulado. Córdoba, Argentina". Universidad Nacional de Córdoba.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2011. Guía Metodológica para la estimación de emisiones PM_{2.5}. 1ra ed.

- Soares, A. 2014. Guías de Calidad del Aire de la OMS. Material Particulado, Ozono, Dióxido de Nitrógeno y Dióxido de Azufre. México: Organización Panamericana de la Salud. Recuperado de: https://www.google.com/url?q=http://www.paho.org/mex/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=869&sa=U&ved=0aUhUKewj8_d-S84TLAhXJKB4KHZTpDksQFggFMAA&client=internal-uds-cse&usg=AFQjCNHIIHYv81rnK2h9GfyxXiDJBstpCnw.
- Sun, L. et al. 2016. "Aerosol Optical Depth Retrieval over Bright Areas using Landsat 8 OLI Images". *Remote Sensing* 8(23): pp.1–14.
- USEPA. 2014. "Air Quality Index (AQI) - A Guide to Air Quality and Your Health". (February): 12. Recuperado de: <http://airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.aqi>.
- United State Geological Survey (USGS). 2017. Landsat Missions. Landsat 8. Recuperado de: <https://landsat.usgs.gov/landsat-8>.
- World Health Organization. 2003. Report on a WHO Working Group Bonn, Germany 13–15 January 2003 Health Aspects of Air Pollution with Particulate Matter, Ozone and Nitrogen Dioxide. Recuperado de: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/112199/E79097.pdf.
- . 2013. "Health Effects of Particulate Matter: Policy Implications for Countries in Eastern Europe, Caucasus and Central Asia". *Journal of the Korean Medical Association* 50(2): 20. Recuperado de: <http://synapse.koreamed.org/DOIx.php?id=10.5124/jkma.2007.50.2.175>.
- . 2015a. Health in 2015: From MDGs, Millennium Development Goals to SDGs, Sustainable Development Goals. Switzerland. <http://who.int/gho/publications/mdgs-sdgs/en/>.
- . 2015b. Reducing Global Health Risks. Through Mitigation of Short-Lived Climate Pollutants. Scoping Report For Policy-Makers. ed. Vallaurie Crawford. Switzerland. Recuperado de: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140673615609011> <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140673615608546> http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/189524/1/9789241565080_eng.pdf?ua=1.
- . 2016. Health Risk Assessment of Air Pollution. Copenhagen: World Health Organization.

CORRESPONDENCIA

Cecilia García
 Jr. Juan Francisco Ramos N° 380, Andahuaylas,
 Apurímac.
cegrivas@gmail.com
cgarcia@unajma.edu.pe