

ESTIMACIÓN DE CONTAMINACIÓN DEL AIRE POR PM10 EN QUITO DETERMINADO POR INDICES AMBIENTALES OBTENIDOS CON IMÁGENES SATELITALES LANDSAT ETM+

César Iván Alvarez¹, Oswaldo Padilla²

¹*Departamento de Ciencias de La Tierra y la Construcción, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador.*

²*Departamento de Ciencias de La Tierra y la Construcción, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador.*

cesarivanalvarezmendoza@gmail.com; opadilla@espe.edu.ec

Resumen: La contaminación del aire en las ciudades es un proceso que ha crecido con el pasar de los días. Actualmente se ha buscado reducir esta contaminación y los factores que la involucran mediante una buena gestión ambiental identificando los focos de contaminación con técnicas como estaciones pasivas y automáticas de monitoreo de calidad de aire. La ciudad de Quito tiene este equipamiento en algunos sectores, pero otras ciudades en el Ecuador no la tienen por ser estos costosos, así que se busca otras metodologías que puedan contribuir a determinar donde se encuentran los contaminantes y como hacer una buena gestión en ciudades donde no se tienen muchos recursos.

El presente trabajo realiza una investigación en definir si modelos generados a partir de imágenes satelitales junto a los datos de campo, adaptados a modelos de regresión simple y múltiple, pueden ser ocupados en nuestro país, con resultados satisfactorios en la ciudad de Quito.

En la ciudad se tienen datos de contaminantes del aire como material particulado menor a 10 micras (PM10) de manera diaria debido a los datos de las estaciones de monitoreo, que al ser combinados con datos de imágenes satelitales tratadas pueden ayudar a determinar espacialmente los lugares donde se tienen problemas y sugerir a que otras ciudades que no tienen los recursos para adquirir y mantener estaciones permanentes de aire puedan optar por esta metodología.

Los resultados obtenidos en la investigación son muy satisfactorios en vista de que se logra para cada uno de los 3 años en los cuales se obtienen los datos, modelos que se ajustan con un buen nivel de correlación.

Palabras Clave: Imagen satelital, Landsat, PM10, Estación pasivas, Contaminación del aire, NDVI, LWCI, SAVI, TB, NSI, PM10 Calculado, REMMAQ.

Abstract: Air cities pollution is a process that has been growing day after day. At the moment reduce pollution, and the factors involved through good environmental management by identifying pollution sources with techniques such as passive and automatic air quality monitoring stations. At Ecuador only Quito has an Air monitoring program, so are looking for other methodologies that can help determine pollutants and how to good management in cities where people do not have many resources.

This paper defines whether models generated from satellite images with field data have been models adapted to simple, and multiple regression can be employed in Quito with satisfactory results to define PM10.

B. DISEÑO DEL PROYECTO

El PM10 es uno de los contaminantes del aire que más afecta la ciudad de Quito, es así que se busca realizar el diseño del proyecto evaluando cuál es el modelo más adecuado en base a regresión para determinar PM10 en Quito mediante imágenes satelitales tratadas con su respectivo análisis digital y muestreo de datos en campo (Figura 2).

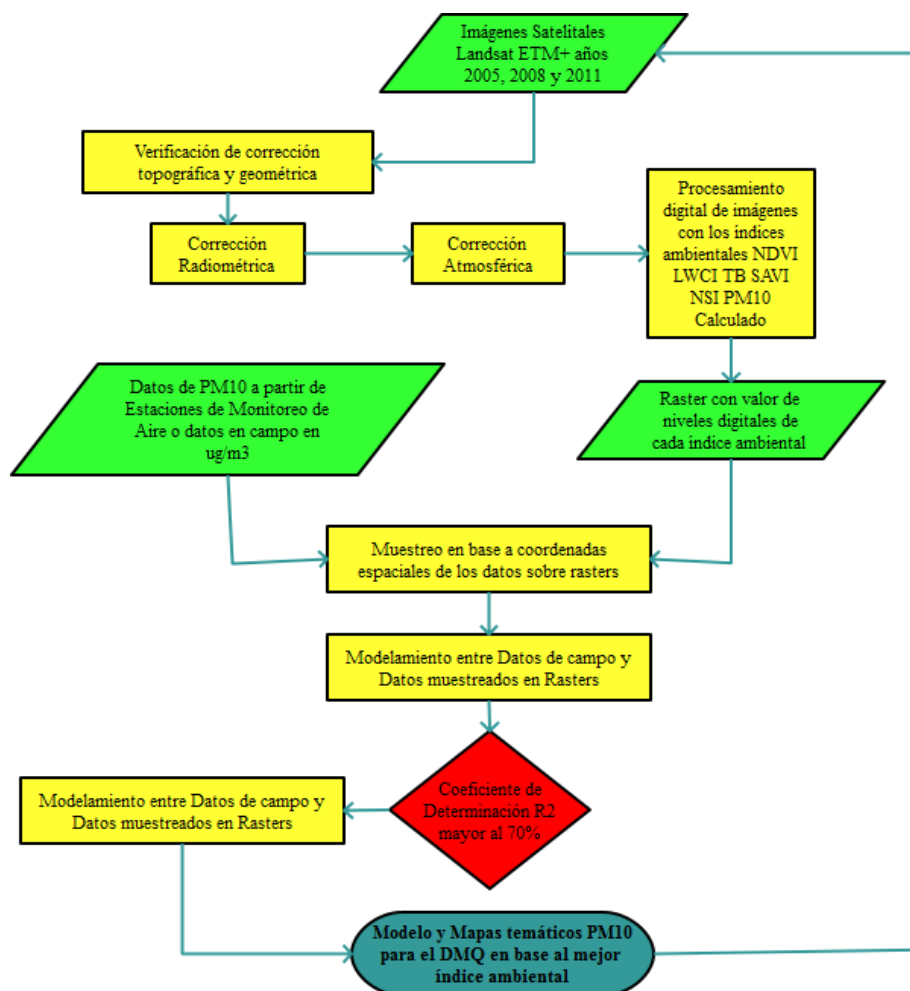


Figura 2 Esquema metodológico del proyecto

C. SELECCIÓN DE DATOS BASE

Para poder realizar el estudio se seleccionaron imágenes satelitales Landsat 7 de los años 2005, 2008 y 2011. Fueron escogidos estos años en vista de que eran imágenes con menos cantidad de cobertura de nubes en la zona de estudio y tenían épocas de toma en meses similares. Adicional se obtuvo los datos de la red de monitoreo pasivo del aire del contaminante PM10 de Quito (Figura 3) en las fechas previstas por las imágenes satelitales (Tabla 1).

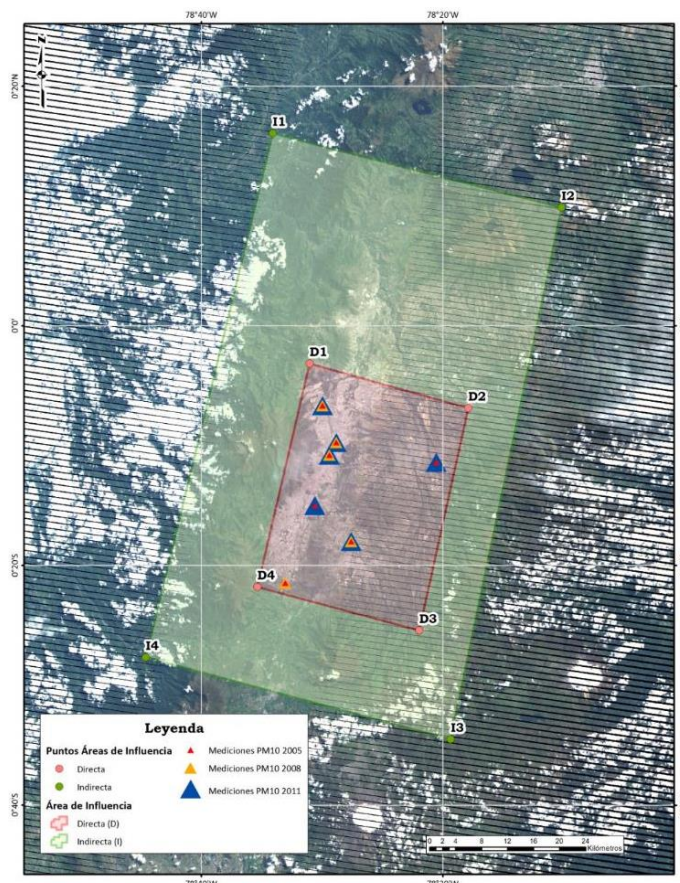


Figura 3 Ubicación de puntos de Monitoreo de PM10
Fuente: NASA, Imagen Landsat (2011), Path 10, Row 60, ID LE70100602011159ASN00.

TABLA 1 Datos PM10 Monitoreo Semiautomático en el Distrito Metropolitano de Quito

Fecha Imagen	09/07/2005	17/07/2008	08/06/2011
Estación	Julio 2005	Julio 2008	Junio 2011
Cotocollao	92,03	32,28	24,81
Belisario	52,14	38,84	33,17
Jipijapa	29,42	25,39	21,32
Guamaní	94,11	39,97	-
Los Chillos	28,52	31,09	23,58
El Camal	-	-	37,7
Tababela	-	-	25,72

Nota. Promedio mensual de PM10 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de acuerdo a las fechas de adquisición de las imágenes satelitales. Fuente: Secretaria de Ambiente del DMQ (2014). Caracterización física y química del material particulado MP10. Disponible en: <https://sites.google.com/site/redesmanualesypasivas/caracterizacion-quimica-y-fisica-de-material-particulado-pm10>

D. MODELACIÓN DE DATOS

Para realizar la modelación ya con los datos de las imágenes satelitales se realizaron las diferentes correcciones y cálculos de índices. Entre los datos modelados se seleccionaron los

índices ambientales NDVI, SAVI, TB, NSI y PM10 Calculado y los datos de PM10 tomados en campo por las estaciones de monitoreo pasivo para obtener modelos mediante regresiones. El Índice de vegetación de diferencia normalizado (NDVI) ha sido reconocido como uno de los indicadores más útiles para el estudio de características de la biosfera terrestre y su dinámica, a nivel global, regional y local (Chuvieco, 2010). El modelo se muestra en la Ecuación 1.

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R} \quad (1)$$

Donde,

NIR = Infrarrojo Cercano Banda 4 en Landsat 7

R = Rojo Banda 3 en Landsat 7

El índice de contenido de agua en hojas (LWCI), propuesto por Hunt et al. (1987) se basa en la interrelación entre las reflectividades en el infrarrojo de onda corta (SWIR) y en el NIR. Fue obtenido aplicando la Ecuación 2.

$$LWCI = \frac{-\log(1-(NIR-SWIR))}{-\log(1-(NIRFT-SWIRFT))} \quad (2)$$

Donde,

NIR = Infrarrojo Cercano Banda 4 en Landsat 7

SWIR = Infrarrojo de Onda Corta 1 Banda 5 en Landsat 7

NIRFT = Valor máximo Infrarrojo Cercano Banda 4 en Landsat 7

SWIRFT = Valor máximo Infrarrojo de Onda Corta 1 Banda 5 en Landsat 7

La temperatura de brillo (TB) se obtiene a partir de corregir radiométricamente y atmosféricamente las bandas térmicas del Landsat y la radiancia espectral a nivel de sensor, de la banda térmica, usando la Ecuación 7 (Landsat Project Science Office, 2008) utilizada para la corrección atmosférica del térmico en la Ecuación 3.

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{CAT}+1\right)} \quad (3)$$

El Índice de vegetación ajustado al suelo o SAVI por sus siglas en inglés, propuesto por Huete (1988), es apropiado para regiones que tienen baja cubierta vegetal y consecuentemente alto porcentaje de reflectancia del suelo, aplicando la Ecuación 4.

$$SAVI = \left[\frac{(NIR-R)}{(NIR+R+L)} \right] (1 + L) \quad (4)$$

Donde,

NIR = Infrarrojo Cercano Banda 4 en Landsat 7

R = Rojo Banda 3 en Landsat 7

L = Coeficiente de ajuste de la vegetación, equivalente a 0,5, recomendado para densidades intermedias (Chuvieco, 2010).

El índice de diferencia normalizada de suelos (NSI), propuesto por Roger y Kearney (2004), destaca las áreas construidas y en suelo desnudo, dado a que estas superficies son más reflectivas en el SWIR que en el NIR. Se calcula mediante la Ecuación 5.

$$NSI = \frac{SWIR-NIR}{SWIR+NIR} \quad (5)$$

Donde,

NIR = Infrarrojo Cercano Banda 4 en Landsat 7

SWIR = Infrarrojo de Onda Corta 1 Banda 5 en Landsat 7

El índice para PM10 Calculado, mediante algunos parámetros como correcciones radiométricas, valores de radiancia y reflectancia, valores de ganancia alta y baja de la banda térmica del sensor Landsat ETM+, entre otros, se ha logrado definir la siguiente ecuación para determinación de PM10 (Universiti Sains Malaysia, 2012), representado en la ecuación 6.

$$PM10_c = e_0R_{atm1} + e_1R_{atm2} + e_2R_{atm3} \quad (6)$$

Donde,

PM10_c = Concentración de partículas (PM10) calculado desde imágenes Landsat.

R_{atmi} = reflectancia atmosférica, i = 1 y 3 son el número de bandas, es decir la reflectancia atmosférica para la banda 1, 2 y 3, obtenidos a partir de Ecuación 6.

E_j = coeficientes algorítmicos, j = 0, 1, 2 y 3, determinados empíricamente. Estos coeficientes se logran al realizar una regresión lineal multivariable con el método de mínimos cuadrados entre los valores de reflectancia atmosférica y PM10 obtenido en campo.

Posteriormente al determinar los modelos en base a regresiones con cada uno de los índices y los datos en campo, se determinó cada uno de los coeficientes de determinación R², el cual indica el ajuste del modelo. La ecuación que contenga el coeficiente R² mayor sería la que se seleccione para modelar la variable dependiente PM10, esto se realizó para cada uno de los 3 años.

III. Evaluación de resultados y discusión

Los resultados de la investigación fueron favorables ya que el modelo seleccionado obtuvo un coeficiente de determinación R² mayor al 95% para cada uno de los años investigados (Tabla 2), así se puede definir que el modelo de PM10 Calculado en base a una regresión lineal múltiple donde sus variable independientes son las bandas 1, 2 y 3 del Landsat 7, posterior al procesamiento de correcciones, sirve para aplicación en el país con buenos resultados.

TABLA 2 Coeficiente de determinación R² para los dos modelos de regresión que mejor se ajustan para determinar PM10 a partir de índices ambientales.

Imagen	Tipo de regresión	Índice	R ²
09/07/2005	Polinómica de 2do Grado	SAVI	0,726
	Lineal múltiple	PM10 Calculado	0,999
17/07/2008	Polinómica de 2do Grado	NSI	0,495
	Lineal múltiple	PM10 Calculado	0,942
08/06/2011	Polinómica de 2do Grado	LWCI	0,315
	Lineal múltiple	PM10 Calculado	0,983

Una vez definidos los modelos que se aplicarán para cada uno de los años en base al coeficiente de determinación R² más alto (Tabla 3), se definió el modelo para todas las imágenes con su ecuación respectiva tanto para los años 2005 (Figura 4), 2008 (Figura 5) y 2011 (Figura 6), clasificándolos de manera espacial de acuerdo a la tabla del TULSMA Libro VI Anexo 4 del Ministerio del Ambiente para valores permisibles de PM10.

TABLA 3 Ecuaciones finales del modelo PM10 calculado que mejor se ajusta a cada año con las imágenes Landsat 7 definidas.

Imagen	Ecuación	R ²
09/07/2005	$PM10_{2005} = 462,927 - 10863,881B1 + 789,300B2 + 7046.990B3$	0,999
17/07/2008	$PM10_{2008} = 0,669 - 27,283B1 + 1332,318B2 - 1023,902B3$	0,942
08/06/2011	$PM10_{2011} = 48,445 - 896,818B1 + 2858,231B2 - 2113,895B3$	0,983

Donde,

B1 = Banda 1 en Landsat 7 corregida radiométrica y atmosféricamente

B2 = Banda 2 en Landsat 7 corregida radiométrica y atmosféricamente

B3 = Banda 3 en Landsat 7 corregida radiométrica y atmosféricamente.

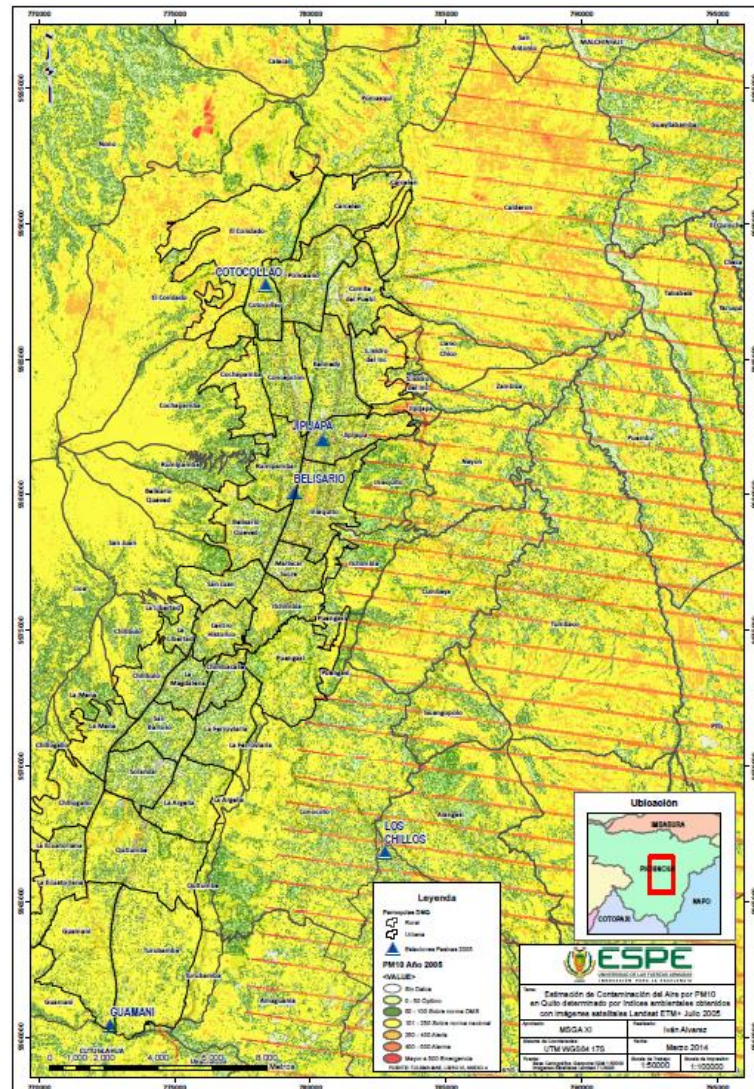
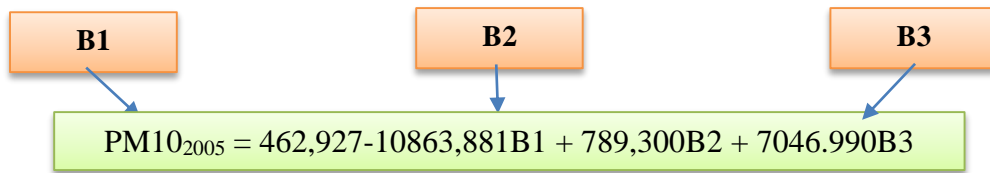


Figura 4 PM10 en base a modelo año 2005 en Quito

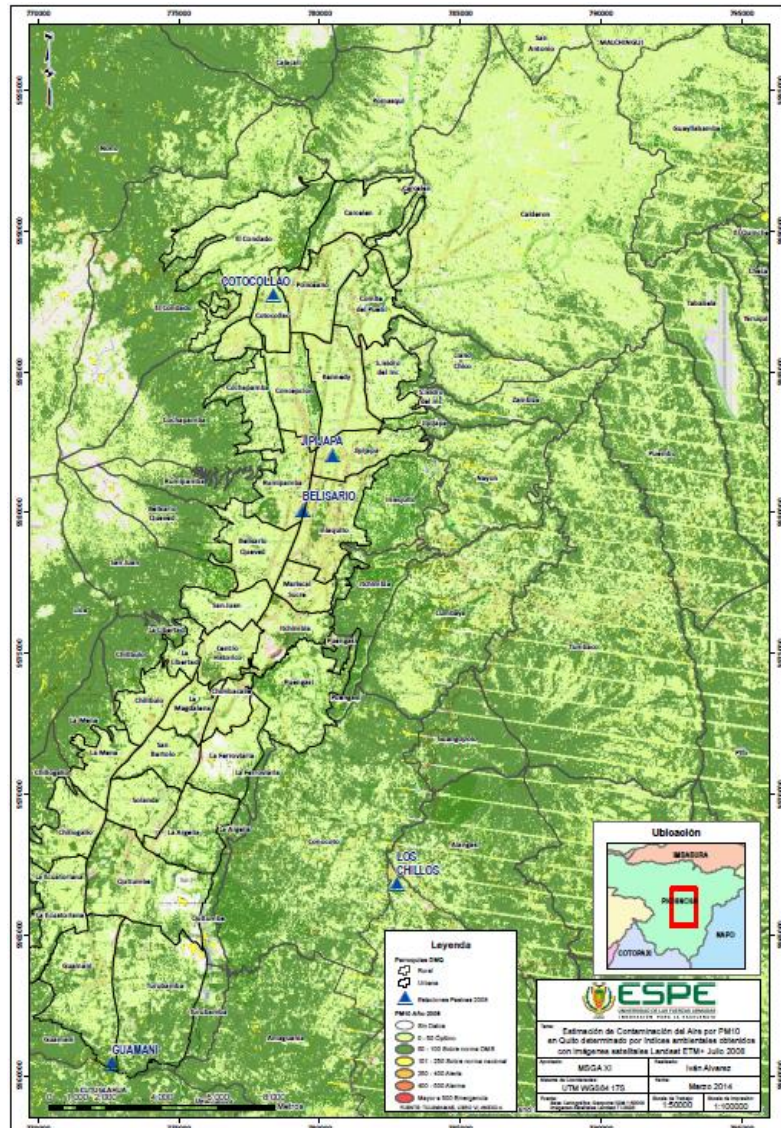


Figura 5 PM10 en base a modelo año 2008 en Quito

Se puede puntualizar que existieron zonas identificadas claramente donde se puede definir como el PM10 se ha encontrado a mayor manera en base a los modelos, así sectores como San Antonio de Pichincha (Figura 6) donde se conoce la presencia de canteras existen datos altos de PM10. De la misma manera el sector de Zambiza donde se encontraba el antiguo botadero de basura de Quito (Figura 7) es otro lugar identificado con concentraciones altas de PM10.

Así en base al modelo correspondiente a cada año se puede espacializar la variable del contaminante atmosférico PM10 para la ciudad de Quito, identificando como el PM10 ha influenciado en la ciudad en diferentes años y como esta técnica de modelamiento en base a imágenes satelitales puede ayudar a obtener datos de calidad de aire en otras ciudades del Ecuador.

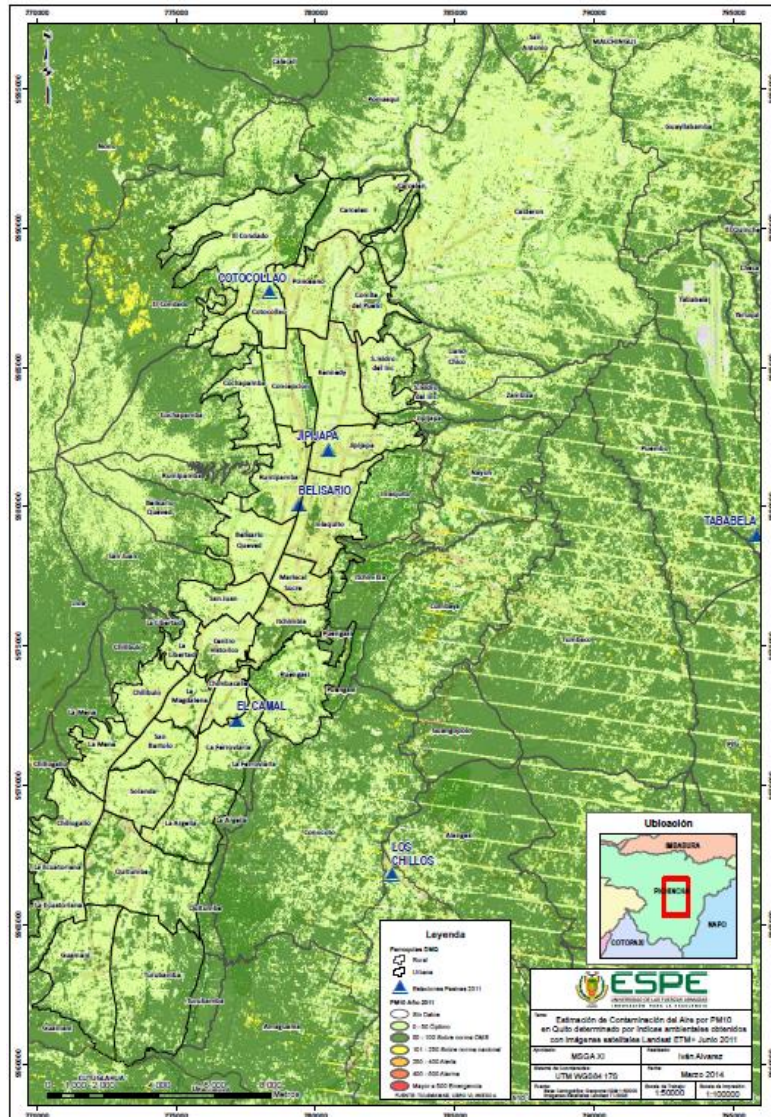


Figura 6 PM10 en base a modelo año 2011 en Quito

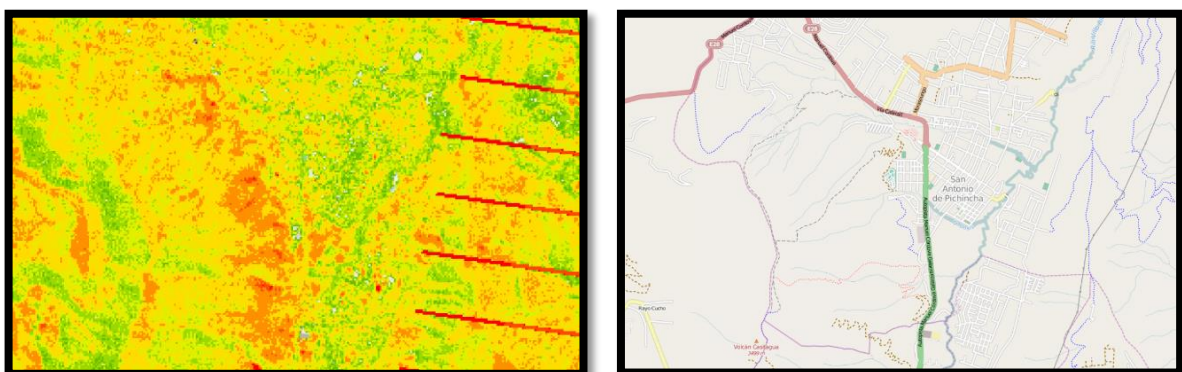


Figura 7 PM10 año 2005 sector San Antonio de Pichincha

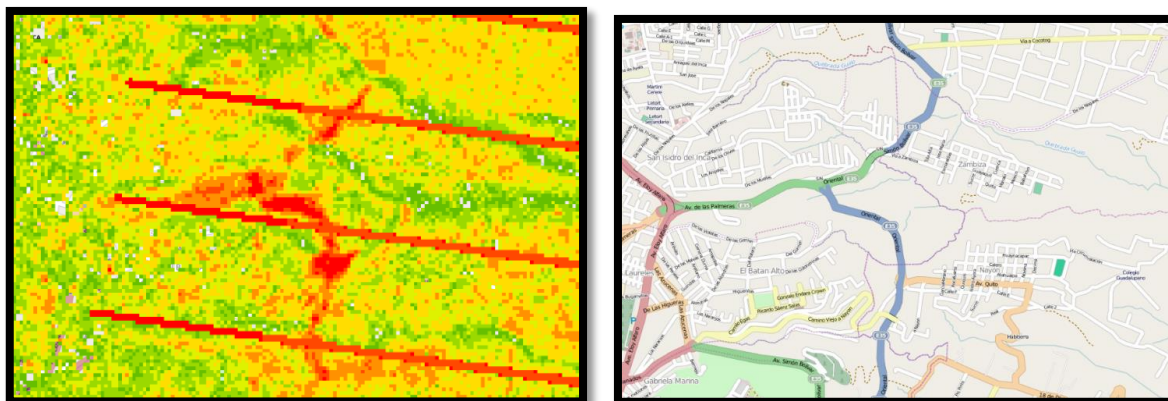


Figura 8 PM10 año 2005 sector Zambiza

IV. Trabajos relacionados

El modelo de regresión lineal múltiple determinado por la Universidad de Sains Malaysia (2010) explica de manera similar a lo comparado en la determinación de modelos para PM10 en Quito, donde al compararlo con modelos de regresión en base a otros índices ambientales, este supo tener una correlación mayor al 95%, similar a la correlación que se tuvo el momento de generación propia del modelo (mayor al 90%). Con esto se identifica que los índices ambientales están de manera significativa relacionados a las bandas del visible de las imágenes satelitales Landsat, en vista de que el modelo puede ser utilizado en diferentes latitudes.

V. Conclusiones y trabajo futuro

- El modelo que mejor se ajusta al cálculo de PM10 para el DMQ es justamente el llamado PM10 calculado basado en una regresión lineal múltiple para los 3 años, donde la significancia de cada una de las 3 bandas que intervienen en la ecuación es importante para su determinación.
- El PM10 afecta directamente a los valores de radiancia de las imágenes satelitales, es así que se tienen valores de R^2 altos al momento de generar el modelo con las diferentes bandas, considerándose así que donde existan problemas de contaminación de aire se podrá analizar estos con imágenes satelitales.
- A partir de imágenes satelitales se puede obtener valores de contaminantes del aire como PM10 sin la necesidad de tener una gran cantidad de datos, así con esta información muchas ciudades en el país podrán aplicar el modelo solo basándose en realizar ciertas mediciones en diferentes puntos.
- Los índices ambientales típicos como NDVI, LWCI, TB, SAVI y NSI pudieron ser calculados y determinados de manera correcta, pero para este modelo no tuvieron alta significancia en comparación al modelo de PM10 Calculado, considerándose que estos índices deberían ser motivo de estudio constante para otras investigaciones.
- Dentro de las zonas con mayor cambio en concentración por PM10 se pueden definir que se encontró lugares típicos donde es conocido la presencia de este contaminante como San Antonio de Pichincha con sus canteras, Tabacundo con las diferentes florícolas, Zambiza y el antiguo botadero de basura de la ciudad, entre otros para el año 2005. Para el caso del año 2008 y 2011 la concentración de PM10 en la ciudad se mantiene en niveles aceptables aún, cumpliéndose dentro de la normativa del TULSMA. No obstante esto se da en Quito, pero vale la pena realizar el estudio en

otras ciudades donde no existen estudios o análisis de presencia de PM10 para conocer como es su comportamiento y determinar cómo aplicar una mejor Gestión Ambiental en el aire, adicional a estudios con otros contaminantes del aire e imágenes satelitales.

Referencias Bibliográficas

- Chander, G., Markham, B., and Barsi, J. (2007), *Revised Landsat-5 Thematic Mapper Radiometric Calibration*, IEEE Geoscience and Remote sensing letters, 4 (3), 490-494.
- Chuvienco, E. (2002). *Teledetección ambiental, la observación de la tierra desde el espacio*. Editorial Ariel Ciencia, Barcelona España.
- Chuvienco, E., Hantson, S., (2010). *Procesamiento estándar de imágenes Landsat*. Instituto Geográfico Nacional. 1 (1). Disponible en: http://www.ign.es/PNT/pdf/especificaciones-tecnicas-pnt-mediatar-landsat_v2-2010.pdf
- Coll, C., Galve, J., Sánchez, J., Caselles, V. (2010) *Validation of Landsat-7/ETM+ Thermal-Band Calibration and Atmospheric Correction With Ground-Based Measurements*, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 48 (1), 547–555.
- Hollinger, D. (2008), *Spatial correlation between Landsat 5 TM-derived vegetation spectral indices and corn yield in northwest Ohio*, Papers of the Applied Geography Conferences 31, 85-94.
- Martínez, F., Herrero, J., Casterad, M. (2014) *Utilización de la Banda Térmica de Landsat en la discriminación de terrenos yesosos [On line]*. Disponible en: http://digital.csic.es/bitstream/10261/43993/1/HerreroJ_Symp_2011.pdf
- NASA. (2014) *Landsat 7 Handbook. Radiometric Characteristics [On line]*. Disponible en: http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/data_properties/
- Othman, N., Mat, M., Hwee, L., (2010). *Estimating Particulate Matter Concentration over Arid Region Using Satellite Remote Sensing: A Case Study in Makkah*. Modern Applied Science, 4(11). Disponible en: <http://www.ccsenet.org/journal/index.php/mas/article/download/6363/6063>
- Padilla, O., (2005). *Cartografía de áreas Quemadas a Escala Local*. Universidad de Alcalá de Henares. Disponible en: <http://noticias.espe.edu.ec/latingeo/files/2012/08/Cartograf%C3%ADa-de-%C3%81reas-Quemadas-Mediante-An%C3%A1lisis-Multitemporal-e-Im%C3%A1genes-Satelitales-de-Diferentes-Sensores1.pdf>
- Santana, L., Escobar, L., Capote, P. (2010). *Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite*. Revista de Geografía Norte Grande, 45, 77-95.
- Satimagingcorp. (2012) *Characterization of Satellite Remote Sensing Systems [Online]*. Disponible en: <http://www.satimagingcorp.com/characterization-of-satellite-remote-sensing-systems.html>
- Secretaría de Ambiente del DMQ (2014). *Caracterización física y química del material particulado MP10*. Disponible en: <https://sites.google.com/site/redesmanualesypasivas/caracterizacion-quimica-y-fisica-de-material-particulado-pm10>
- The Yale Center for Earth Observation. (2010) *Converting Landsat TM and ETM+ thermal bands to temperature*. Disponible en: http://www.yale.edu/ceo/Documentation/Landsat_DN_to_Kelvin.pdf