

Detección de Polvo del Sahara sobre Puerto Rico Utilizando Imágenes del Sensor MODIS

*Josean Barbosa Toro
Maestría en Ciencia y Tecnología Geoespacial
Prof. Raúl Matos Flores
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental y Agrimensura
Universidad Politécnica de Puerto Rico*

Resumen - Durante el verano del año 2015, Puerto Rico sufrió los efectos de una sequía severa. La presencia de polvo del Sahara sobre el ambiente es uno de los factores que contribuyen a que se intensifique tal condición. Usando imágenes satelitales y técnicas de teledetección es posible detectar dicho material en la atmósfera. Utilizando el software ArcMap y la técnica de Índice de Polvo de Diferencia Normalizada (NDDI, por sus siglas en inglés) se buscó detectar la presencia de polvo mineral sobre 12 imágenes del Espectroradiómetro de Imágenes de Media Resolución que cubrían el período del 12 al 21 de junio del 2015. Dicha técnica puede arrojar valores que van desde -1 hasta 1. En ésta, los valores positivos son atribuidos a polvo mineral. De las fechas analizadas, la imagen que corresponde a las 01:40 p.m. del 13 de junio presentó los mayores valores de NDDI.

Términos Claves - Espectroradiómetro de Imágenes de Media Resolución, Índice de Polvo de Diferencia Normalizada, Polvo del Sahara, Puerto Rico.

INTRODUCCIÓN

El desierto del Sahara es la fuente de polvo mineral más importante del mundo [1]. Gran parte de las tormentas de polvo, o arena, surgen por la erosión de suelos superficiales en regiones áridas o semiáridas [2]. Las tormentas de polvo de África envían enormes cantidades de polvo mineral hacia la atmósfera [3]. Aproximadamente, 60% de este material es transportado hacia el occidente [1]. Se estima que aproximadamente tres mil millones toneladas métricas llegan anualmente hacia el Océano Atlántico [3]. Generalmente, la mayor cantidad de dicho material llega al Caribe durante

los meses de junio hasta octubre [3]. Durante el verano, particularmente, la presencia de particulado proveniente del desierto del Sahara es registrada en Puerto Rico [3].

Por lo general, en medio de los disturbios tropicales que ocurren en verano, se puede observar una masa de aire seco y estable que viene cargada de partículas de polvo sahariano [4]. Existe evidencia científica que demuestra que la temperatura del aire superficial en Puerto Rico ha aumentado [4]. Desde el año 2012, se ha estado registrando un patrón de calor anómalo en la isla [4]. El particulado proveniente del desierto del Sahara ha sido identificado como uno de los diversos factores que han contribuido a que se produzcan inusuales episodios de calor en Puerto Rico [4].

A medida que el material proveniente del Sahara viaja, el tamaño de las partículas disminuye [5]. En el año 1992, se pudo demostrar una correlación positiva entre ataques de asma y la presencia de particulado sahariano menor a 10 μm sobre Puerto Rico [3]. Por tal razón, distintos investigadores han logrado establecer una asociación entre las tormentas de polvo del Sahara y la prevalencia de asma en el Caribe [3]. Las tormentas de polvo en el desierto transportan material biológico que incluye bacterias, esporas de polen, hongos y virus [5]. Antes se pensaba que la radiación ultravioleta destruiría a los microorganismos presentes en las partículas transportadas desde el Sahara antes de llegar al hemisferio occidental [3]. Sin embargo, evidencia reciente muestra que esto no es cierto [3]. En adición a enfermedades respiratorias, las partículas menores a 0.1 μm pueden traer problemas cardiovasculares [5]. La exposición prolongada a

aire cargado de polvo del Sahara puede propiciar enfermedades tales como conjuntivitis e irritación de la piel [5].

Las tormentas de polvo pueden modificar la temperatura del aire mediante la absorción y dispersión de la radiación solar [2]. De igual manera, pueden alterar el régimen y la distribución de precipitación [2]. Por tal razón, estas tormentas pueden intensificar las condiciones de sequía sobre un área y promover la desertificación [2].

Dado los efectos negativos que trae la llegada del polvo del Sahara a Puerto Rico, es de suma importancia emplear métodos útiles que nos permitan monitorear dicho material. El objetivo de esta investigación es utilizar conceptos de teledetección para detectar las partículas de polvo mineral que son transportadas desde el desierto del Sahara hasta Puerto Rico.

El Espectroradiómetro de Imágenes de Media Resolución (MODIS, por sus siglas en inglés) es uno de los instrumentos más utilizados para estudiar el polvo mineral proveniente del desierto del Sahara [6]. El instrumento MODIS fue lanzado por la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) en 1999 a bordo del satélite Terra [1]. En el año 2002, fue lanzado nuevamente, pero en esa ocasión a través del satélite Aqua [2]. La órbita de ambas plataformas es helio-sincrónica y la franja de observación (en inglés, "swath") del sensor es de 2,330 km, lo cual permite que se puedan obtener imágenes diariamente [7]. El sensor MODIS posee una alta sensibilidad radiométrica (12 bit) en 36 canales espectrales, en un rango de longitud de onda que va desde 0.4 μm hasta 14.4 μm [8]. Estos canales espectrales cubren desde el visible hasta el infrarrojo térmico [1]. Las resoluciones espaciales de las bandas espectrales del sensor MODIS son las siguientes: 250 m (bandas 1 - 2), 500 m (bandas 3 - 7) y 1 km (bandas 8 - 36) [8]. Las 36 bandas del sensor MODIS pueden ser catalogadas en dos categorías: solares reflectivas (bandas 1 - 19, 26) y emisión termal (bandas 20 - 36, excluyendo la 26) [8].

Existen varias técnicas para detectar con efectividad la presencia de polvo mineral sobre una región determinada utilizando imágenes del sensor MODIS [9]. Una de estas técnicas es el Índice de Polvo de Diferencia Normalizada (NDDI, por sus siglas en inglés) y fue introducida por John J. Qu en el año 2006 [10]. Este método toma en consideración la reflectancia en la parte superior de la atmósfera de las longitudes de onda 2.13 y 0.469 μm (1) [11]. Las bandas del sensor MODIS que corresponden a estas longitudes de onda son la banda 7 (2.105 - 2.155 μm) y la banda 3 (0.459 - 0.479 μm) (2) [11]. La ecuación de NDDI puede ser expresada de las siguientes dos maneras:

$$\text{NDDI} = \frac{(R_{2.13 \mu\text{m}} - R_{0.469 \mu\text{m}})}{(R_{2.13 \mu\text{m}} + R_{0.469 \mu\text{m}})} \quad (1)$$

$$\text{NDDI} = \frac{(B7 - B3)}{(B7 + B3)} \quad (2)$$

De acuerdo a esta técnica, la reflectancia del polvo mineral comienza a incrementar a partir del largo de onda 0.469 μm hasta llegar al largo de onda 2.13 μm , donde alcanza su valor máximo [2]. Por lo tanto, el polvo mineral posee un alto valor de reflectancia en la banda 7, mientras que en la banda 3 dicho valor es bajo [11]. Las nubes meteorológicas presentan un comportamiento opuesto [11]. Por tal razón, los valores de NDDI serán positivos para los píxeles que contengan polvo mineral [2]. Las nubes meteorológicas, por el contrario, presentarán valores negativos [2].

METODOLOGÍA

Dado que las altas concentraciones de particulado proveniente del desierto del Sahara llegan a Puerto Rico en la temporada del verano, fue fundamental determinar un período de tiempo que correspondiera a esta estación del año. En adición, se tomaron en consideración los informes del tiempo publicados en diferentes rotativos del país, donde se reportaba la presencia de polvo del Sahara sobre el área de estudio. Durante los días del 12 al 19 de junio de 2015, el diario El Nuevo Día publicó consistentemente informes acerca de la

presencia de mencionado material sobre Puerto Rico. Por tal razón, se decidió trabajar con el período de tiempo que va desde el 12 hasta el 21 de junio de 2015. Se extendió el estudio hasta el día 21 para identificar posible polvo residual en la atmósfera.

Seleccionadas las fechas, se procedió a determinar de cuál satélite o sensor se obtendrían las imágenes para realizar la investigación. Como se indicó antes, el sensor MODIS cuenta con las resoluciones temporales y espectrales ideales para llevar a cabo el estudio. Se adquirieron las imágenes a través del portal de Nivel 1 y Sistema de Distribución de Archivos de la Atmósfera (LAADS, por sus siglas en inglés). A excepción del 17 de junio, fue posible obtener imágenes de cada uno de los días comprendidos por el período de tiempo del estudio. Las imágenes descargadas corresponden al nivel 1B de datos, los cuales han sido radiométricamente corregidos y calibrados a unidades físicas [8]. Las imágenes de este nivel contienen las 36 bandas en las cuales el sensor recolecta información [8]. Cada uno de estos datos viene acompañado de un archivo de geolocalización. Este archivo es fundamental para el proceso de georeferenciación.

El objetivo principal del proceso de georeferenciación consiste en definir la proyección de la imagen a utilizar [8]. Tal y como sugiere el concepto, mediante este proceso la imagen es geográficamente referenciada según la proyección especificada. Para realizar este proceso, se utilizó la herramienta MODIS Swath Reprojection Tool (MRT Swath). Esta aplicación es una herramienta abierta que puede ser obtenida gratuitamente a través del Centro de Distribución de Archivos Activos de Procesos Terrestres (LP DAAC, por sus siglas en inglés).

Además del proceso de georeferenciación, la herramienta MRT Swath se utiliza para convertir las imágenes del sensor MODIS a otro formato. Estas imágenes fueron descargadas en formato HDF (Formato de Datos Jerárquicos). Mediante dicha herramienta, las imágenes fueron convertidas de formato HDF a formato TIFF (Formato de

Archivo de Imágenes con Etiquetas). Esta herramienta permite seleccionar las bandas a georeferenciar y a convertir. Para este estudio, se necesitaban las bandas 1, 3, 4 y 7. La combinación de bandas 1-4-3 es necesaria para generar una imagen en color “verdadero”. Por otra parte, las bandas 7 y 3 son indispensables para aplicar la ecuación de NDDI. No obstante, para evitar confusiones y preservar el posicionamiento original de cada banda (p. ej. la banda 7 permanecer en la séptima posición), se decidió trabajar con todas las bandas incluidas en el rango 1-7. Las otras 29 bandas incluidas en las imágenes de nivel 1B fueron descartadas, ya que no eran necesarias para el estudio. En adición a esto, la inclusión innecesaria de estas bandas resultaría en un archivo muy pesado.

Una vez se seleccionaron las bandas 1-7, se procedió a realizar la georeferenciación y la conversión a formato TIFF. A las imágenes se les asignó el sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) y el elipsoide WGS84 (Sistema Geodésico Mundial 1984). Como resultado, la herramienta MRT Swath generó siete archivos georeferenciados y en formato TIFF, los cuales corresponden a las siete bandas procesadas.

Puesto que la herramienta MRT Swath genera cada banda procesada a un archivo individual, fue necesario producir un solo archivo que contuviera la unión de bandas. Para realizar esto se utilizó la herramienta de Bandas Compuestas del software ArcGIS. A excepción de los procesos de georeferenciación y conversión a formato TIFF, los cuales fueron realizados mediante la herramienta MRT Swath, el software ArcGIS fue el programa utilizado para realizar el resto del procedimiento. La imagen de bandas compuestas, tal y como se presume, contiene las siete bandas previamente procesadas. Se pueden realizar múltiples combinaciones RGB (del inglés “Red-Green-Blue”) a través de dicha imagen.

Una vez se generó la imagen de bandas compuestas, se procedió a aplicar el algoritmo de detección de polvo mineral utilizar. Como se indicó anteriormente, la técnica del Índice de Polvo de

Diferencia Normalizada sirve para diferenciar al polvo mineral de las nubes meteorológicas, ya que la arena (componente principal del particulado proveniente del desierto del Sahara) exhibe un comportamiento espectral distintivo en las longitudes de onda de 2.13 y 0.469 μm . Fue necesario utilizar la herramienta Calculadora Ráster para realizar esta tarea. Para poder introducir la ecuación de NDDI, fue fundamental utilizar los archivos individuales de las bandas 7 y 3, las cuales son utilizadas en esta fórmula. A través de esta herramienta se obtiene una imagen resultante de la ecuación empleada. En este caso, la imagen resultante exhibirá valores entre -1 a 1. Tal y como la técnica de NDDI propone, los valores positivos son los que nos interesan, ya que éstos corresponden a la posible presencia de polvo mineral sobre el área de estudio.

La herramienta de Reclasificación, como sugiere su nombre, fue conveniente para reclasificar permanentemente los valores de NDDI en tres categorías. Cada reclasificación se realizó tomando en consideración los histogramas estadísticos individuales de cada imagen. Por tal razón, cada imagen resultante del NDDI fue reclasificada en las siguientes categorías: valores negativos, valores bajos de NDDI y valores altos de NDDI. Puesto que cada reclasificación fue realizada individualmente, y que se analizó el histograma estadístico de cada imagen, los valores bajos o altos de NDDI varían en cada imagen.

De acuerdo a la técnica de NDDI, los valores negativos que fueron generados en las imágenes no son relevantes para este proyecto. Sin embargo, éstos no pudieron ser excluidos del proceso de reclasificación. Para poder eliminarlos, fue necesario utilizar la herramienta Extraer por Consulta de Atributos. Mediante esta herramienta fue posible generar una imagen exenta de valores innecesarios para esta investigación.

Los productos descargados del sensor MODIS cubren una gran extensión territorial. Por tal razón, resultó apropiado cortar la imagen de valores de NDDI reclasificados y reducirla únicamente al área de estudio.

Resultó útil calcular las áreas de las zonas cubiertas únicamente por valores altos de NDDI. Para lograr esto, fue necesario convertir la capa ráster de valores positivos de NDDI a un archivo vectorial utilizando la herramienta De Ráster a Polígono. Luego, se utilizó la herramienta Seleccionar para extraer solamente a los valores altos de NDDI a una capa aparte. Una vez se obtuvo la capa vectorial de valores altos de NDDI, se procedió a añadirle un campo a la tabla de atributos. En este campo, se calculó el área de cada polígono que formaba parte de dicho archivo. El área de cada polígono fue calculada en metros cuadrados. Para poder calcular el porcentaje del área de estudio cubierta por valores altos de NDDI, fue necesario calcular también el área en metros cuadrados de cada municipio de Puerto Rico. El resultado de la suma de las áreas de los polígonos de valores altos de NDDI se dividió entre la suma de las áreas de los municipios de Puerto Rico. De esta manera, fue posible calcular el porcentaje del área de estudio cubierta por valores altos de NDDI.

RESULTADOS

Se analizaron nueve fechas dentro del mes de junio del año 2015, de las cuales se generaron doce imágenes de Índice de Polvo de Diferencia Normalizada. Estas imágenes fueron reclasificadas de manera que mostraran el rango de valores altos de NDDI positivo. En adición, se calculó el área ocupada por dichos valores en cada imagen.

Los cinco municipios donde se dieron las concentraciones más altas de polvo del Sahara (en orden descendente) fueron: Salinas, Isabela, Ponce, Santa Isabel y Guayama. A excepción de Isabela, estos municipios se encuentran en la costa sur de la isla. De acuerdo a los estimados de población en el año 2015 del Censo de los Estados Unidos, los municipios antes mencionados cuentan con aproximadamente 287,015 habitantes. Dado que la población actual de Puerto Rico es de aproximadamente 3,474,182 personas, se puede estimar que 8.26% de los habitantes de la isla se

puedieron ver afectados por las altas concentraciones de polvo del Sahara en la atmósfera.

DISCUSIÓN

Las fechas estudiadas en esta investigación pertenecen al período de tiempo del año 2015 en el cual Puerto Rico sufría los efectos de una sequía severa. La primera imagen analizada corresponde a las 11:30 a.m. (15:30 UTC) del 12 de junio de 2015. Es importante destacar que las fechas de todas las imágenes descargadas procedían del formato juliano. La hora de adquisición de cada imagen procedía del formato UTC. Tanto para la fecha, como para la hora de cada imagen, fue necesario realizar la conversión pertinente. Para convertir cada una de las imágenes a horario local, fue necesario restarle 4 horas al horario UTC. De acuerdo a la Figura 1, podemos observar que en la primera imagen analizada aproximadamente 5.40%

de la isla estaba cubierta por valores altos de NDDI positivo que fluctúan desde 0.21600553 hasta 0.609202385.

Las próximas imágenes analizadas corresponden al 13 de junio de 2015. La Figura 2 corresponde a lo acontecido a las 10:35 a.m. de ese día, mientras que la Figura 3 muestra lo que ocurrió horas más tarde, a las 01:40 p.m. La imagen de las 10:35 a.m. muestra que 2.39% de la isla exhibía valores considerables de NDDI positivo dentro del rango de 0.197731266 hasta 0.634991348. Por su parte, la imagen de las 01:40 p.m. muestra valores altos de NDDI positivo que van desde 0.18528504 hasta 0.660552859. Estos valores cubrieron 4.16% de la isla. El valor de NDDI más alto encontrado en todas las imágenes analizadas corresponde a esta última imagen.

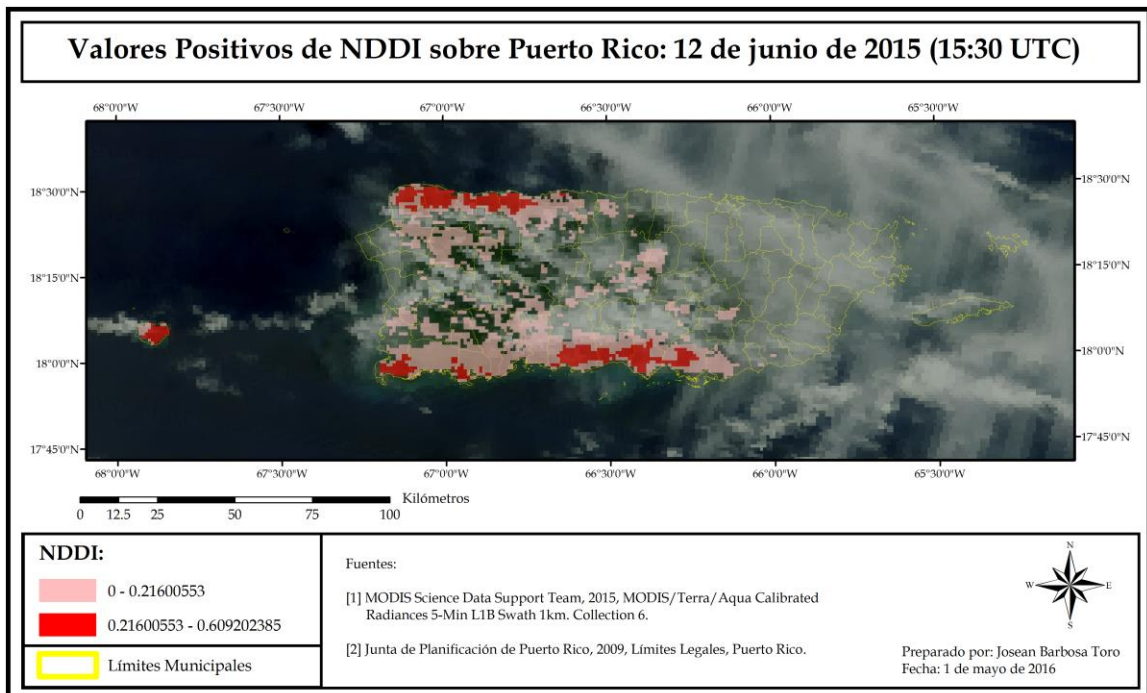


Figura 1

Imagen Correspondiente a las 11:30 a.m. del 12 de Junio de 2015, donde el Valor Mayor de NDDI es de 0.609202385

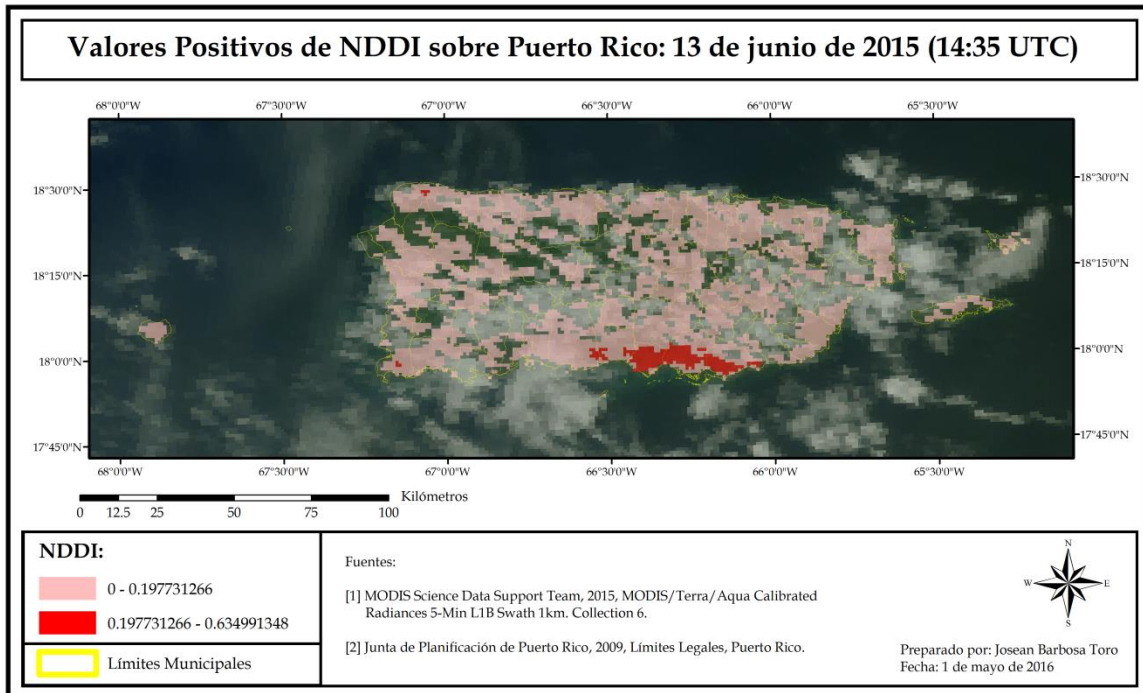


Figura 2

Imagen Correspondiente a las 10:35 a.m. del 13 de Junio de 2015, donde el Valor Mayor de NDDI es de 0.634991348

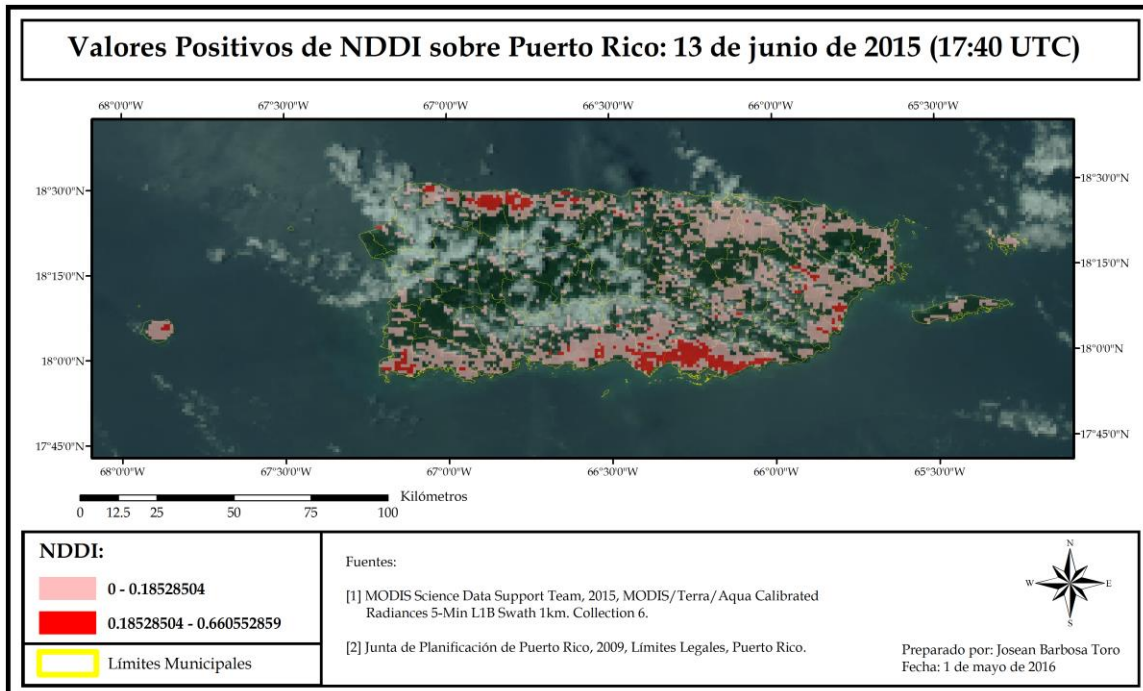


Figura 3

Imagen Correspondiente a las 01:40 p.m. del 13 de Junio de 2015, donde el Valor Mayor de NDDI es de 0.660552859

Se analizaron dos imágenes para el 14 de junio de 2015. La Figura 4 corresponde a la imagen de las 11:20 a.m. y ésta muestra valores que fluctúan desde 0.420881449 hasta 0.641099393. Estos

valores cubrieron 0.09% de la isla. La próxima imagen analizada es de las 02:25 p.m., lo cual significa que es tres horas más tarde a la anterior. No obstante, podemos observar en la Figura 5 que

esta imagen no cuenta con valores positivos de NDDI que sean considerables. De hecho, de todas las imágenes analizadas en este proyecto, ésta es la que cuenta con el valor máximo de NDDI más bajo. El valor mayor de NDDI en esta imagen es de 0.196632228, lo cual es claramente menor a los otros valores que se han encontrado. De acuerdo a

los informes publicados por el diario El Nuevo Día, durante este día dominó la presencia de particulado de polvo del Sahara sobre Puerto Rico [12]. Las imágenes correspondientes no coincidieron con esta información. Sin embargo, esto se puede deber a que la nubosidad presente en las imágenes le haya impedido a la técnica detectar el polvo mineral.



Figura 4

Imagen Correspondiente a las 11:20 a.m. del 14 de Junio de 2015, donde el Valor Mayor de NDDI es de 0.641099393

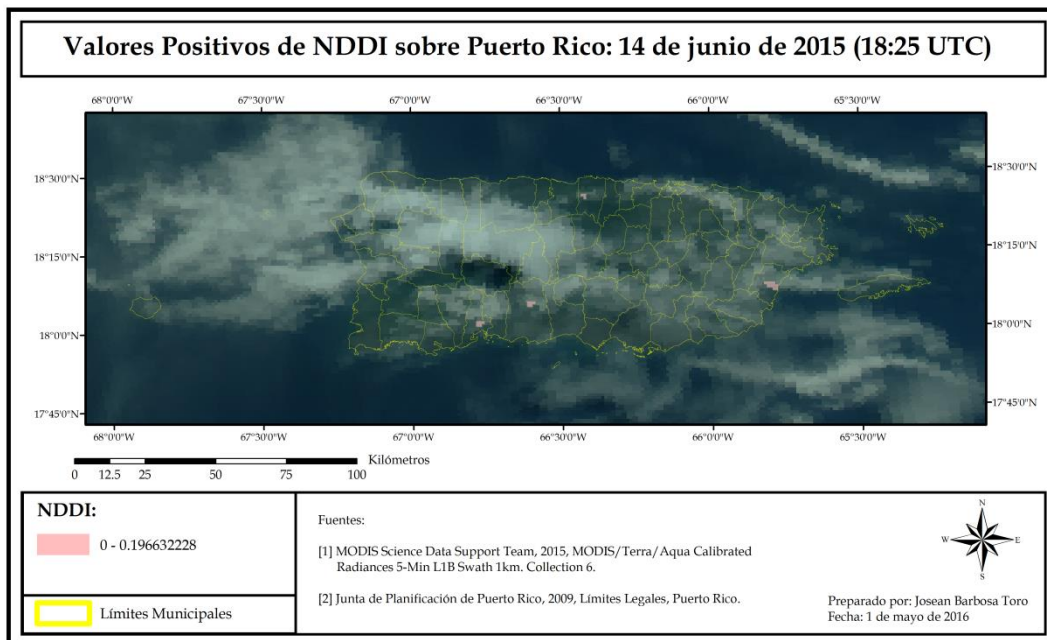


Figura 5

Imagen Correspondiente a las 02:25 p.m. del 14 de Junio de 2015, donde el Valor Mayor de NDDI es de 0.196632228

La imagen del 15 de junio de 2015 corresponde a las 01:30 p.m. La Figura 6 presenta los valores altos de NDDI positivo para esta fecha. La isla estuvo cubierta en un 19.42% de valores desde 0.024860447 hasta 0.645543218. La próxima imagen analizada pertenece al día posterior, el cual corresponde al 16 de junio. Esta imagen muestra lo

ocurrido a las 11:05 a.m. La Figura 7 presenta los valores altos de NDDI positivo y éstos fluctúan entre 0.200774045 y 0.551937044. Podemos observar que la mayoría de los municipios costeros del norte y sur de la isla cuentan con estos valores altos. Aproximadamente, 24.88% de la isla estaba cubierta por valores altos de NDDI positivo.

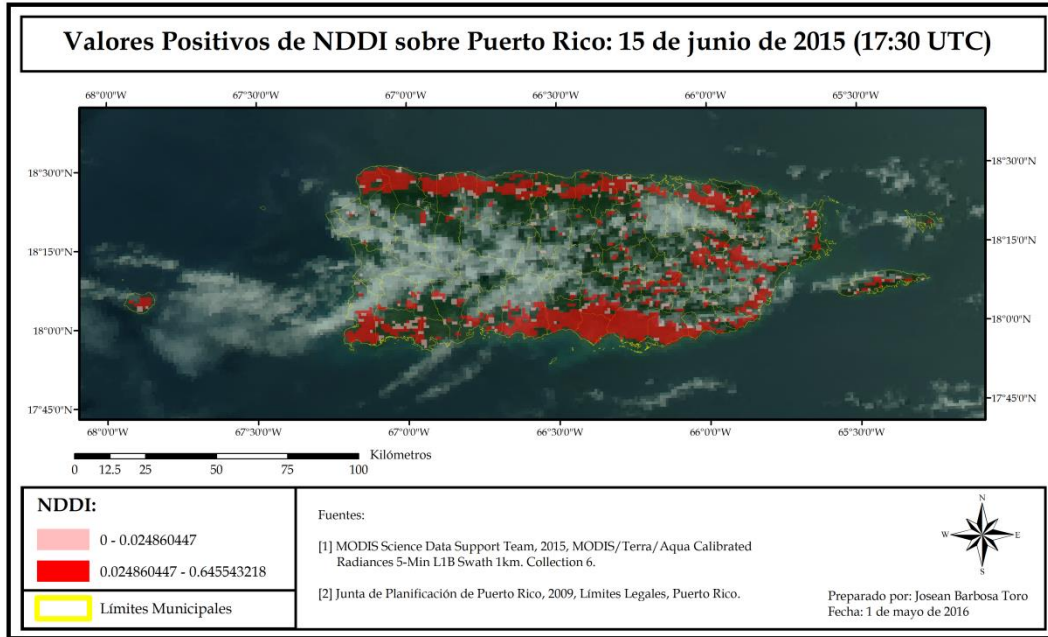


Figura 6

Imagen Correspondiente a las 01:30 p.m. del 15 de Junio de 2015, donde el Valor Mayor de NDDI es de 0.645543218

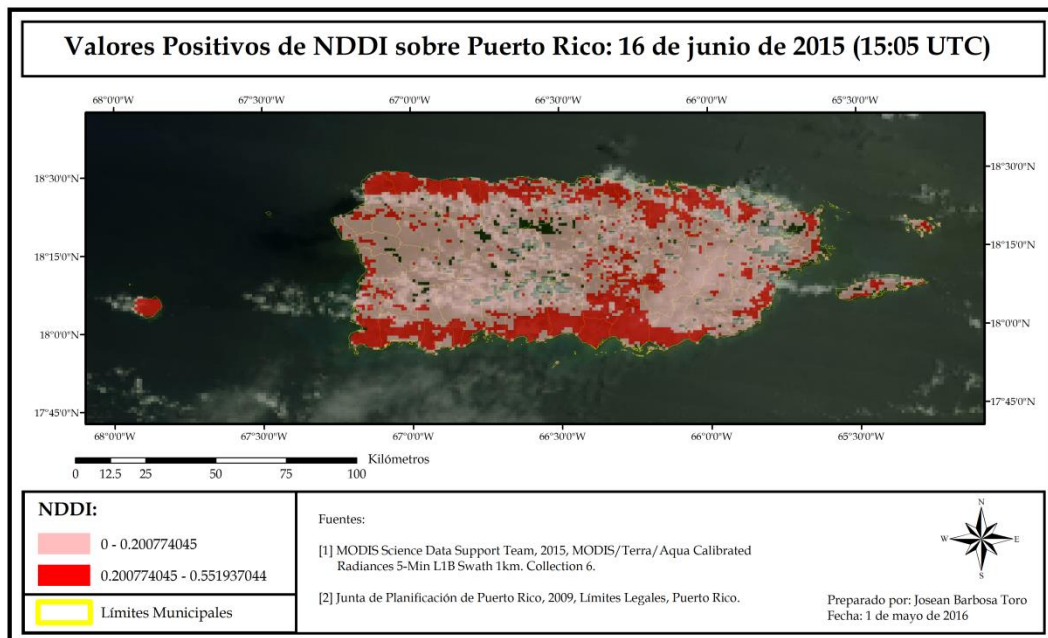


Figura 7

Imagen Correspondiente a las 11:05 a.m. del 16 de Junio de 2015, donde el Valor Mayor de NDDI es de 0.551937044

No fue posible procesar una imagen que correspondiera al 17 de junio de 2015. Afortunadamente, ésta fue la única fecha dentro del período de tiempo del estudio que no pudo ser analizada. Del 18 de junio, fecha posterior, fue posible analizar dos imágenes. La Figura 8 muestra lo ocurrido a las 10:55 a.m., donde 2.03% de la isla

estaba cubierta por valores entre 0.326989935 y 0.613065302. Por su parte, la Figura 9 presenta lo acontecido a las 02:00 p.m. En esta imagen, los valores altos de NDDI positivo fluctúan desde 0.169425405 hasta 0.509906948. La isla estaba cubierta en un 1.81% por dichos valores.

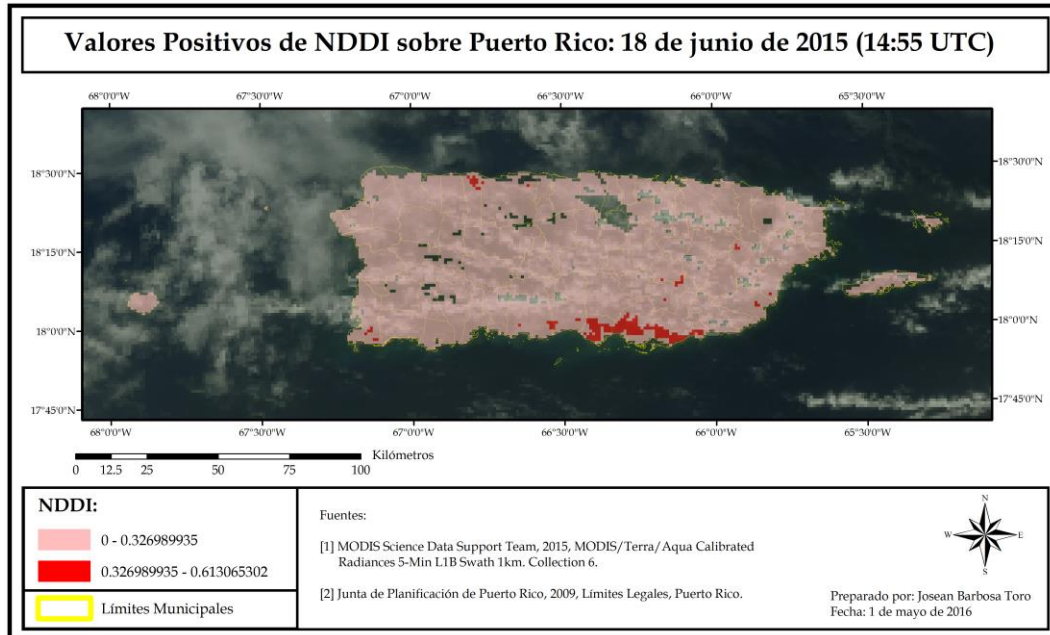


Figura 8

Imagen Correspondiente a las 10:55 a.m. del 18 de Junio de 2015, donde el Valor Mayor de NDDI es de 0.613065302

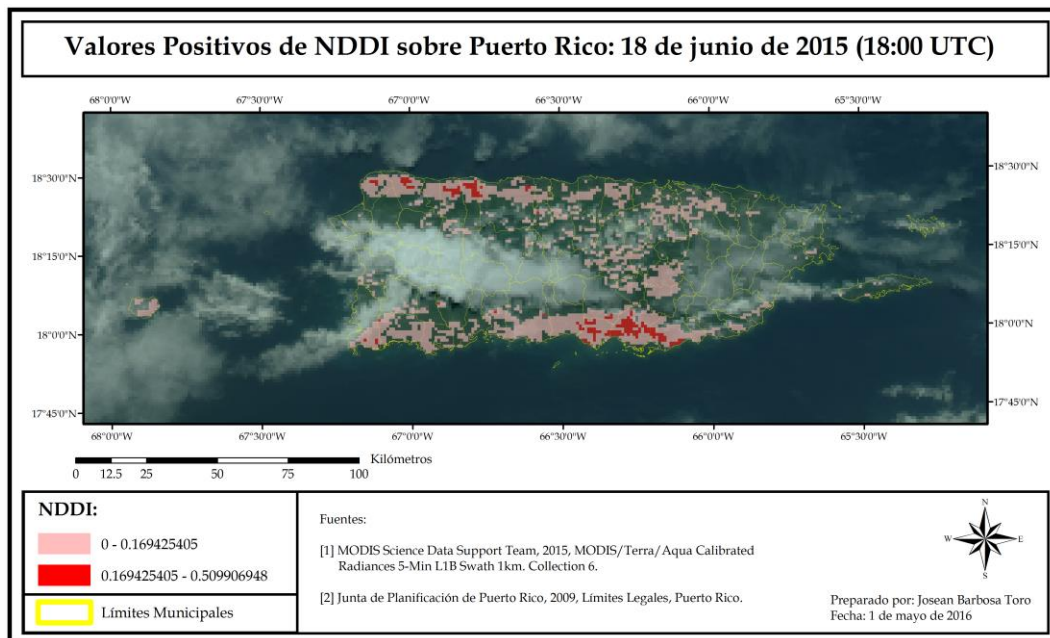


Figura 9

Imagen Correspondiente a las 02:00 p.m. del 18 de Junio de 2015, donde el Valor Mayor de NDDI es de 0.509906948

De acuerdo a los informes publicados por el diario El Nuevo Día, la concentración más grande de polvo del Sahara sobre Puerto Rico registrada en el año 2015 se dio el 19 de junio [13]. De acuerdo a este rotativo, el día fue descrito como uno seco, brumoso y caluroso [13]. La imagen perteneciente a este día corresponde a las 11:35 a.m. La Figura 10 muestra los valores altos de NDDI positivo detectados en esta fecha, los cuales fluctúan entre 0.295390243 - 0.632140696. Aunque estos valores no abundaron en la imagen, podemos observar que

la imagen correspondiente al próximo día sí estaba cargada de ellos. Posiblemente, la alta concentración de polvo del Sahara que llegó a la isla el 19 de junio permaneció varios días sobre ella. La Figura 11 pertenece a las 10:40 a.m. del 20 de junio de 2015. Podemos observar que 41.84% de la isla estuvo cubierta por valores que van desde 0.109646236 - 0.455834959. Del período de tiempo seleccionado para este estudio, en esta fecha se dio la mayor cobertura de valores altos de NDDI positivo sobre Puerto Rico.

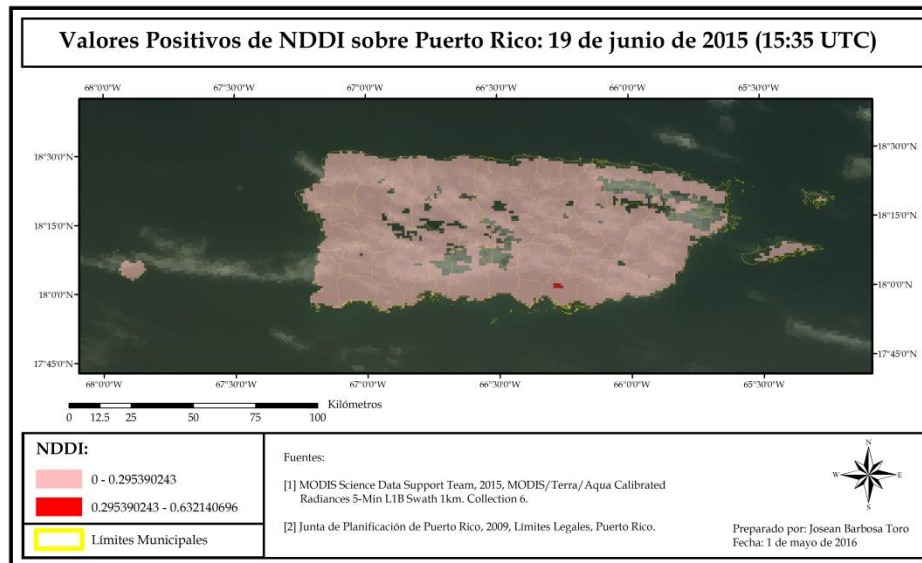


Figura 10

Imagen Correspondiente a las 11:35 a.m. del 19 de Junio de 2015, donde el Valor Mayor de NDDI es de 0.632140696

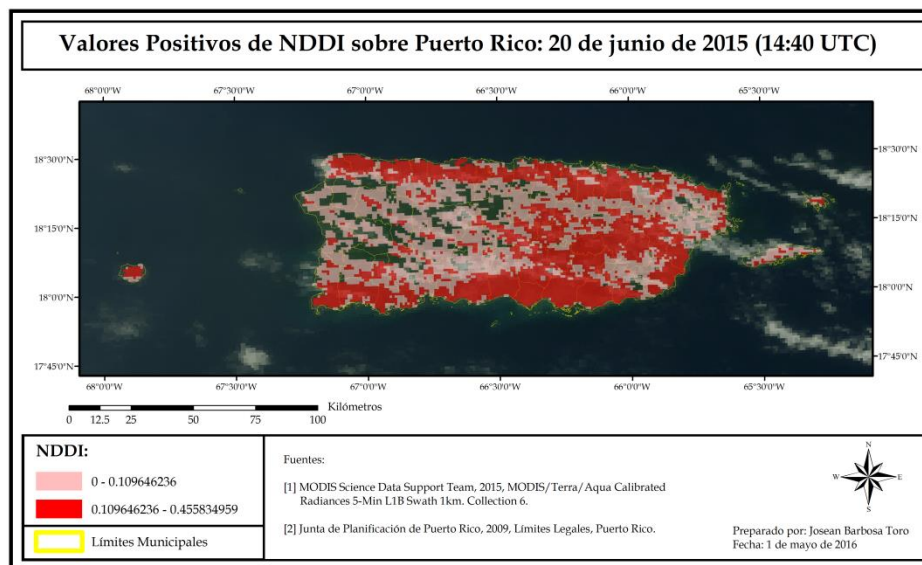


Figura 11

Imagen Correspondiente a las 10:40 a.m. del 20 de Junio de 2015, donde el Valor Mayor de NDDI es de 0.455834959

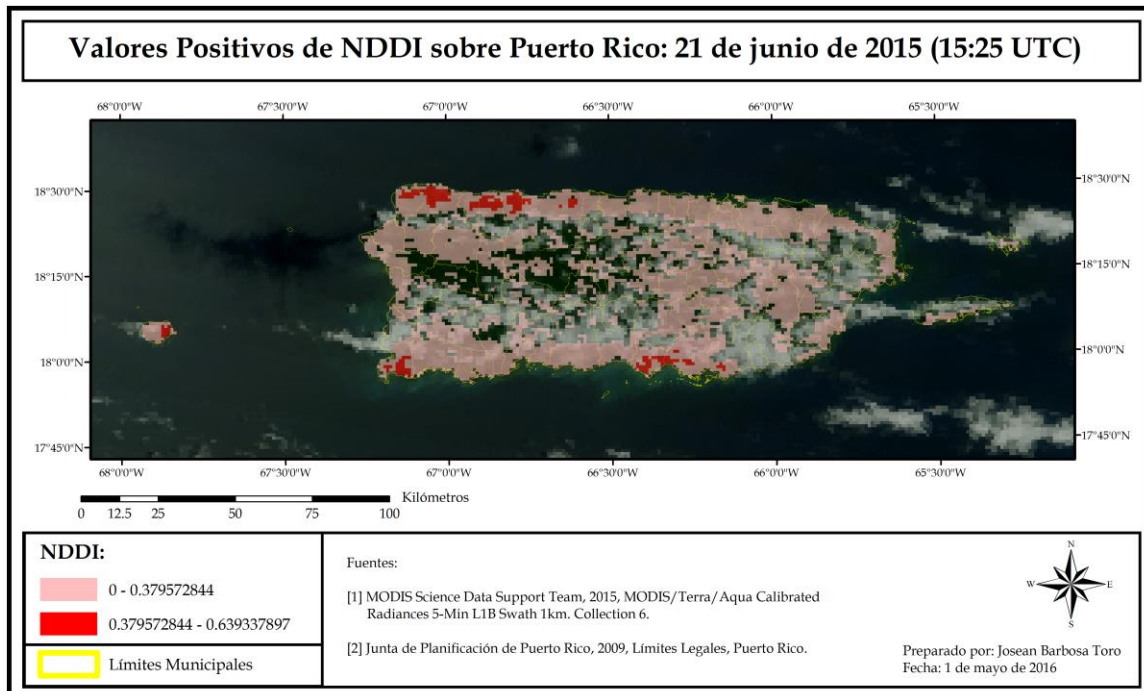


Figura 12

Imagen Correspondiente a las 11:25 a.m. del 21 de Junio de 2015, donde el Valor Mayor de NDDI es de 0.639337897

La última imagen analizada pertenece al 21 de junio de 2015. Esta imagen corresponde a las 11:25 a.m. y cuenta con valores altos de NDDI positivo que fluctúan entre 0.379572844 - 0.639337897. La Figura 12 presenta dichos valores. Aproximadamente, 2.36% de la isla estaba cubierta de estos valores.

CONCLUSIÓN

De las doce imágenes analizadas en este proyecto, solamente en una de ellas no fue posible hallar valores significativos de NDDI positivo. Esta imagen corresponde al 14 de junio de 2015, fecha donde, de acuerdo al rotativo El Nuevo Día, hubo presencia de particulado proveniente del desierto del Sahara sobre Puerto Rico. Aunque no se puede afirmar con completa certeza la razón por la cual no fue posible detectar valores altos de NDDI positivo, debemos tomar en consideración factores como la nubosidad en la imagen. Es decir, es posible que la abundancia de nubes en la misma le haya impedido al algoritmo de NDDI detectar con efectividad valores significativos. También debemos tener en cuenta que, aunque de forma general, el algoritmo

de NDDI es muy eficiente a la hora de detectar polvo mineral sobre una región, éste no es perfecto.

Para una próxima investigación, sería conveniente cotejar los resultados obtenidos mediante la técnica de NDDI con medidas o datos de campo y de otras fuentes. También, sería ideal emplear otras técnicas de detección de polvo mineral y compararlas con la aplicada en este proyecto. No obstante, podemos concluir que la técnica del Índice de Polvo de Diferencia Normalizada es lo suficientemente efectiva para la detección de polvo mineral sobre una región determinada.

REFERENCIAS

- [1] D. G. Kaskaoutis, P. G. Kosmopoulos, P. T. Nastos, H. D. Kambezidis, M. Sharma, and W. Mehdi, "Transport pathways of Sahara dust over Athens, Greece as detected by MODIS and TOMS," *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 3, no. 1, pp. 35–54, Feb. 2012.
- [2] N. Karimi, A. Moridnejad, S. Golian, J. M. Vali Samani, D. Karimi, and S. Javadi, "Comparison of dust source identification techniques over land in the middle east region using MODIS data," *Canadian Journal of Remote Sensing*, vol. 38, no. 5, pp. 586–599, Nov. 2012.

- [3] B. Jiménez-Vélez, Y. Detrés, R. A. Armstrong, and A. Goda, "Characterization of African dust (PM_{2.5}) across the Atlantic ocean during AEROSE 2004," *Atmospheric Environment*, vol. 43, no. 16, pp. 2659–2664, May 2009.
- [4] P. Méndez Lazaro, O. Martínez Sánchez, R. Méndez Tejeda, E. Rodríguez, E. Morales, and N. Schmitt Cortijo, "Extreme Heat Events in San Juan Puerto Rico: Trends and Variability of Unusual Hot Weather and its Possible Effects on Ecology and Society," *Journal of Climatology & Weather Forecasting*, vol. 03, no. 02, pp. 1–7, Jul. 2015.
- [5] A. S. Goudie, "Desert dust and human health disorders," *Environment International*, vol. 63, pp. 101–113, Feb. 2014.
- [6] E. El-ossta, R. Qahwaji, and S. S. Ipson, "Detection of dust storms using MODIS reflective and Emissive bands," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 6, no. 6, pp. 2480–2485, Dec. 2013.
- [7] X. Ma, K. Bartlett, K. Harmon, and F. Yu, "Comparison of AOD between CALIPSO and MODIS: Significant differences over major dust and biomass burning regions," *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 6, no. 9, pp. 2391–2401, Sep. 2013.
- [8] M. Jean-François, *Aplicaciones del sensor MODIS para el monitoreo del territorio*, 1st ed. México, D.F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2011, pp. 1–318.
- [9] M. Shahrisvand and M. Akhoondzadeh, "A Comparison of Empirical and Intelligent Methods for Dust Detection Using Modis Satellite Data," *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-1, no. W3, pp. 371–375, Sep. 2013.
- [10] J. J. Qu, X. Hao, M. Kafatos, and L. Wang, "Asian dust storm monitoring combining terra and Aqua MODIS SRB measurements," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 3, no. 4, pp. 484–486, Oct. 2006.
- [11] M. Samadi, A. Bolorani, S. Alavipanah, H. Mohamadi, and M. Najafi, "Global dust detection index (GDDI): a new remotely sensed methodology for dust storms detection," *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, vol. 12, no. 20, pp. 1–14, 2014.
- [12] F. Rosario, "Continúa el descenso de los embalses," in *El Nuevo Día*, 2015. [Online]. Available: <http://www.elnuevodia.com/noticias/locales/nota/continuaeIdescensodelosembalses-2059482/>. [Accessed: Apr. 17, 2016].
- [13] F. Rosario, "Onda deja muy poca lluvia," in *El Nuevo Día*, 2015. [Online]. Available: <http://www.elnuevodia.com/noticias/locales/nota/ondadepocalluvia-2061372/>. [Accessed: Apr. 17, 2016].