

Estudio de una intrusión de polvo sahariano en la atmósfera de Colombia*

Juan Felipe Méndez**
Laura Catalina Pinto Herrera***
Luis Carlos Belalcázar Cerón***

Recibido: 26/01/2017 • Aceptado: 18/09/2017

DOI: 10.22395/rium.v17n32a1

Resumen

El desierto del Sahara es una de las principales fuentes de material particulado en el mundo, el cual tiene la capacidad de afectar la calidad del aire a miles de kilómetros de la fuente. Las intrusiones de este polvo en el Caribe están bien documentadas; sin embargo, no se han reportado intrusiones de este contaminante en grandes ciudades colombianas. En este artículo se analiza y determina la posible relación entre las emisiones de polvo del Sahara y un episodio de alta contaminación que se registró en Bogotá y Medellín a finales de junio de 2014. Se utilizaron los datos registrados por las redes de calidad del aire de Bogotá y Medellín, la densidad másica de columna de polvo del proyecto Merra-2 y los resultados del modelo NMMB/BSC-Dust. Se rastrearon las trayectorias y el origen de las masas de aire por la implementación de Hysplit, y el tipo de aerosol fue obtenido por medio del sensor Caliop-Calipso.

Palabras clave: calidad del aire; polvo africano; teledetección; transporte de largo alcance.

* Derivado de investigación titulada Estudio de la intrusión de polvo sahariano en Colombia.

** Estudiante de Maestría en Ingeniería Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. jf.mendez@uniandes.edu.co

*** Estudiante de Maestría en Ingeniería Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. lc.pinto@uniandes.edu.co

**** Ph. D. en Modelación de Procesos Ambientales. Grupo de Investigación Calidad del Aire (GICA), Departamento de Ingeniería Química y ambiental, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. Correo electrónico: lcbelcazarc@unal.edu.co

Study of a Saharan Dust Intrusion into the Colombian Atmosphere

Abstract

The Sahara Desert is one of the main sources of particulate matter (PM) in the world. This PM has the ability to affect air quality thousands of miles from the source. The intrusions of this dust in the Caribbean are well documented; however, no intrusions of this pollutant have been reported in large Colombian cities. This article analyses and determines the possible relationship between the emissions of dust from the Sahara, and an episode of high pollution that occurred in Bogotá and Medellín at the end of June 2014. The data recorded by the air quality networks of Bogotá and Medellín, the dust column mass density of the Merra-2 project, and the results of the NMMB/BSC-Dust model were used. The origins and trajectories of air masses were tracked by implementing HYSPLIT. The aerosol subtype was obtained from the CALIOP-CALIPSO sensor.

Keywords: air quality; African dust; remote sensing; long-range transport.

Estudo de uma mobilização de pó saariano à atmosfera da Colômbia

Resumo

O deserto do Saara é uma das principais fontes de material particulado (MP) no mundo. Esse MP tem a capacidade de afetar a qualidade do ar a milhares de quilômetros da fonte. As mobilizações desse pó ao Caribe estão bem documentadas; contudo, não foram relatadas intrusões desse poluente em grandes cidades colombianas. Neste artigo, é analisada e determinada a possível relação entre as emissões de pó do Saara e um episódio de alta poluição registrado em Bogotá e Medellín no final de junho de 2014. Utilizaram-se os dados registrados pelas redes de qualidade do ar dessas cidades, a densidade mássica de coluna de pó do projeto Merra-2, os resultados do modelo NMMB/BSC-Dust. Além disso, implementou-se o modelo Hysplit para determinar as origens e trajetórias das massas de ar presentes durante o episódio.

Palavras-chave: pó africano; transporte de longo alcance; qualidade do ar; teledeteção.

INTRODUCCIÓN

Un aerosol se define en su forma más simple como una colección de partículas sólidas o líquidas suspendidas en un gas: estas incluyen un amplio rango de tipos de partículas, tales como polvo, polen, hollín, humo, ceniza, niebla y esmog, entre otras [1]. Los aerosoles se encuentran presentes en la atmósfera por diversas fuentes de emisión (naturales o antropogénicas) con un transporte de corto y largo alcance. Adicionalmente, el material particulado (PM, por sus iniciales en inglés) presente en los aerosoles es considerado un contaminante atmosférico de interés global (independientemente de su origen, antropogénico o no) ya que altera la composición atmosférica y es asociado a efectos adversos en salud [2, 3].

Según Shao [4], alrededor del 60% de las emisiones minerales naturales se generan en el desierto del Sahara. El polvo del Sahara puede ser levantado por convección en las zonas desérticas con mayor temperatura, lo cual lo puede hacer alcanzar alturas en el rango de 1,1 a 2,9 km [5]; desde allí se puede transportar por las masas de aire alrededor del mundo. Este transporte impacta positivamente los ecosistemas alrededor del mundo, pues este polvo contiene una gran cantidad de nutrientes para el suelo. En el caso de Colombia, la cuenca amazónica se ve impactada a nivel productivo y fértil pues la carga de fósforo que posee el polvo sahariano contribuye a los ciclos biogeoquímicos, específicamente en el crecimiento de los árboles endémicos del Amazonas [6]. De forma paralela, se deben tener en cuenta potenciales impactos negativos como la reducción de la visibilidad con afectación en el tránsito aéreo [7], el aumento notable de la temperatura en superficie y el incremento de la estabilidad atmosférica, así como la contribución a la inhibición del desarrollo de los sistemas nubosos [8]. A la par con lo anterior, se ha registrado anualmente el transporte de polvo del Sahara a través del océano Atlántico hacia el continente Americano debido al flujo de vientos alisios, lo cual afecta especialmente la cuenca del Amazonas y del Caribe [9, 10].

En febrero de 2015 se publicó un artículo que proporcionó la primera estimación satelital multianual del tráfico total de polvo del Sahara hasta el Amazonas [6]. En este, se afirma que el análisis sobre el viaje transcontinental de polvo del Sahara cobra relevancia debido al contenido de fósforo, un macronutriente esencial para el crecimiento vegetal del cual la selva amazónica depende para mantener un balance adecuado [6].

La llegada de polvo proveniente del desierto del Sahara a la cuenca caribeña ha sido muy estudiada y documentada durante los últimos años [10]. Esta región se ha visto seriamente afectada por las partículas suspendidas en el aire durante épocas de mínimas precipitaciones debido a altas concentraciones de hierro proveniente del

Sahara, según estudios realizados en Puerto Rico [11]. Estudios realizados en Costa Rica han relacionado el aumento en los niveles de concentración de PM_{10} debido a la intrusión del polvo del Sahara y episodios de afectación en la salud humana, sobre todo en aumentos de casos registrados de afecciones tales como infecciones respiratorias agudas (IRA), asma y alergias, aproximadamente en más de 400 casos sobre el promedio semanal para el periodo en estudio [12].

En la isla de Trinidad en el Caribe, se observó una asociación entre el aumento de los ingresos hospitalarios por asma pediátrica y una mayor cubierta de polvo sahariano. El mejor modelo de ajuste obtenido estimó que, en un mes como junio, aumentaría una tasa de admisión diaria de 7,8 a 9,25 asmáticos [13].

En Colombia, un estudio por medio del cual se analizó la situación durante el año 2012 evidenció la intrusión de polvo africano al norte del país, con las concentraciones más altas entre marzo y septiembre [10]; sin embargo, no evidenció presencia de polvo en otras zonas del territorio colombiano. El presente estudio, por su parte, identifica y analiza una intrusión anómala de polvo del Sahara en Colombia como posible fuente y causa de la concentración más alta de PM_{10} en Bogotá y Medellín durante el año 2014.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

1.1 Análisis de las concentraciones de PM_{10} en Bogotá y Medellín

Se obtuvieron datos de concentración horaria de PM_{10} para el año 2014 de las redes de vigilancia de calidad del aire: Área Metropolitana del Valle de Aburrá para Medellín, y Secretaría Distrital de Ambiente para Bogotá. Por ciudad se eligieron las estaciones que registraron más del 80% de datos del año de estudio. El aseguramiento de la calidad de datos se ejecutó por parte de la autoridad ambiental competente, con base en el sistema de aseguramiento de la calidad de datos del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Se realizaron promedios aritméticos de 24 horas por ciudad, con el fin de analizar su comportamiento diario.

Se generaron gráficas de dispersión-regresión (acordes con la distribución de los datos) para el análisis estadístico de asociación entre el comportamiento de las concentraciones de PM_{10} Medellín y PM_{10} Bogotá en dos periodos de tiempo: 1), aproximadamente un mes antes y un mes después de la intrusión de polvo del Sahara; y 2), catorce días antes, un día durante y catorce días después de la intrusión de polvo del Sahara. A partir de las pruebas de normalidad Shapiro-Wilk, Anderson-Darling y el gráfico Q-Q, se calcularon coeficientes de correlación y valores de significancia para ambos periodos de tiempo. Este análisis se realizó con el fin de determinar la existencia de un comportamiento asociativo entre concentraciones de polvo min-

eral en Bogotá y Medellín. Se usó el software libre R, versión 3.4.1, para el análisis estadístico.

1.2 Análisis del transporte transatlántico de polvo sahariano e intrusión en Colombia a partir del proyecto Merra-2 y el modelo NMMB/BSC-Dust

La densidad másica de columna de polvo fue tomada de la plataforma de la NASA–Giovanni. Su fuente es la segunda versión del Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications (Merra-2), el cual permite realizar un análisis atmosférico usando el Global Earth Observation System, versión 5 (GEOS-5) [10], junto con el sistema de asimilación de datos atmosféricos, versión 5.12.4 (ADAS, por sus siglas en inglés) [14]. La densidad másica de columna de polvo del proyecto Merra-2, del Centro de Servicios de la NASA Goddard Earth Sciences Data and Information (GES DISC) [15], es obtenida a partir de un reanálisis global a largo plazo que relaciona las observaciones espaciales de los aerosoles, así como sus interacciones con otros procesos físicos en el sistema climático [15]. La variable utilizada está asociada con la masa de polvo por unidad de área integrada a lo largo de una trayectoria de observación [16], obtenida a través de la integración de la densidad volumétrica sobre una columna de aire (1) [17].

$$\sigma = \int_a^b p(z) dz \quad (1)$$

Donde $p(z)$ es la densidad másica en función de la altura z .

Se adquirieron datos geográficos con una resolución temporal horaria y una resolución espacial de $0,5^\circ \times 0,625^\circ$, con los siguientes límites de estudio: $82.1875W$, $4.75S$, $44.3125E$, $37.75N$. Posteriormente, se generaron mapas con promedios aritméticos por día de la densidad másica de columna de polvo. El periodo de análisis comprendió desde el 20 de junio al 4 de julio de 2014 (siete días antes, durante y después de la intrusión de polvo sahariano). Los datos fueron manejados en el formato netCDF y analizados mediante el software ArcGIS 10.2.2 con WGS-1984 como referencia espacial. Conjuntamente, se realizó el análisis de intrusión de polvo por departamento colombiano, adoptando el marco geocéntrico nacional de referencia Magna-Sirgas.

Adicionalmente, se emplearon los resultados del modelo NMMB/BSC-Dust [18] para el análisis de intrusión de polvo africano en Colombia el 27 de junio de 2014 a las 00 UTC, 06 UTC, 12 UTC y 18 UTC. Este modelo, operado por el Barcelona Supercomputing Center-Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS) de España, proporcionó los mapas de carga de polvo (g/m^2), deposición seca y húmeda de polvo

(mg/m³), así como variables meteorológicas: dirección y velocidad del viento (m/s) a 700hPa, nubosidad total, precipitación acumulada de 3 horas (mm) y presión atmosférica (hPa). La consulta de los pronósticos se realizó en la página del BSC-CNS [19]. La cantidad de polvo estimado anualmente por el modelo tiene una incertidumbre que oscila entre 1000 y 2150 Tg/año con las mayores contribuciones emitidas del norte de África (50-70%) y los desiertos de Asia (10-25%) [20].

1.3 Simulación de trayectorias de masas de aire con Hysplit – NOAA

Se utilizó el modelo Híbrido Lagrangiano de Trayectoria Integrada de Partícula Única (Hysplit, por sus siglas en inglés) con el fin de estimar las trayectorias regresivas (retrotrayectorias) de masas de aire y determinar la posible fuente de emisión [21] causante del incremento en concentración de PM₁₀ en Bogotá y Medellín. Se calcularon retrotrayectorias con tres alturas —1000, 2000 y 3000 metros sobre el nivel del suelo—, asociadas con transporte de masas de aire intercontinental. La simulación se realizó partiendo desde las 18 UTC del 27 de junio de 2014 con un tiempo total de corrida de 192 horas, con el método de movimiento vertical isobárico para minimizar efectos de movimiento vertical [21]. Hysplit dispone de varias bases meteorológicas, de las cuales las más usadas son: 1), Sistema de Asimilación de Datos Globales con grilla de Resolución de 1 grado de latitud/longitud (GDAS1 por sus siglas en inglés) [21] del National Center for Environmental Protection (NCEP); y 2), Reanalysis, que brinda datos del National Center for Atmospheric Research (NCAR) y de NCEP con resolución horizontal de 2,5 grados latitud [21]. En Colombia existen pocos estudios en los que se evalúen las diferentes bases de datos meteorológicas del NCEP para Hysplit, razón por la que en el presente estudio se emplean esas bases de datos y se comparan los resultados.

1.4 Análisis de la distribución vertical de aerosoles con el sensor Calipso – Calipso

Calipso (Cloud-Aerosol Lidar and Infra- Red Pathfinder Satellite Observation) es un satélite polar de la NASA destinado a la observación de aerosoles atmosféricos. Este cuenta con un láser sensible a la polarización de 2 longitudes de onda, denominado Calipso (Cloud Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization). Esta es una herramienta muy útil, debido a tres características: a), al recibir la luz láser retrodispersada de diferentes capas de la atmósfera a lo largo del haz láser transmitido, Calipso puede medir con precisión la distribución vertical global del aerosol; b), la capacidad de Calipso para medir la relación de despolarización hace posible distinguir los aerosoles de polvo de otros tipos de aerosoles; y c), este satélite puede detectar aerosoles de polvo para cualquier superficie terrestre durante el día y la noche [22-24].

El producto CAL_LID_L1-Standard-V4-10 (nivel 1B) fue utilizado para analizar el perfil vertical de la atmósfera del 20 de junio al 4 de julio de 2014, teniendo en cuenta las trayectorias satelitales más cercanas al sitio de investigación.

2. RESULTADOS

2.1 Análisis de las concentraciones de PM₁₀ en Bogotá y Medellín

Las concentraciones diarias de PM₁₀ en Bogotá y Medellín durante el año 2014 fueron más altas durante los periodos enero-mediados de abril (32-102 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de promedio diario en Medellín y 23-92 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Bogotá) y septiembre-diciembre (35-75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de promedio diario en Medellín y 22-99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Bogotá). Durante estos periodos se presentaron escenarios de temporada seca en las zonas de estudio. Durante los meses de junio y julio disminuyeron las condiciones oceánicas y atmosféricas favorables para el desarrollo del Niño, como el debilitamiento de la circulación atmosférica de oeste a este [25] y mayores velocidades de masas de aire de este a oeste con respecto a meses posteriores (figura 1) [26].

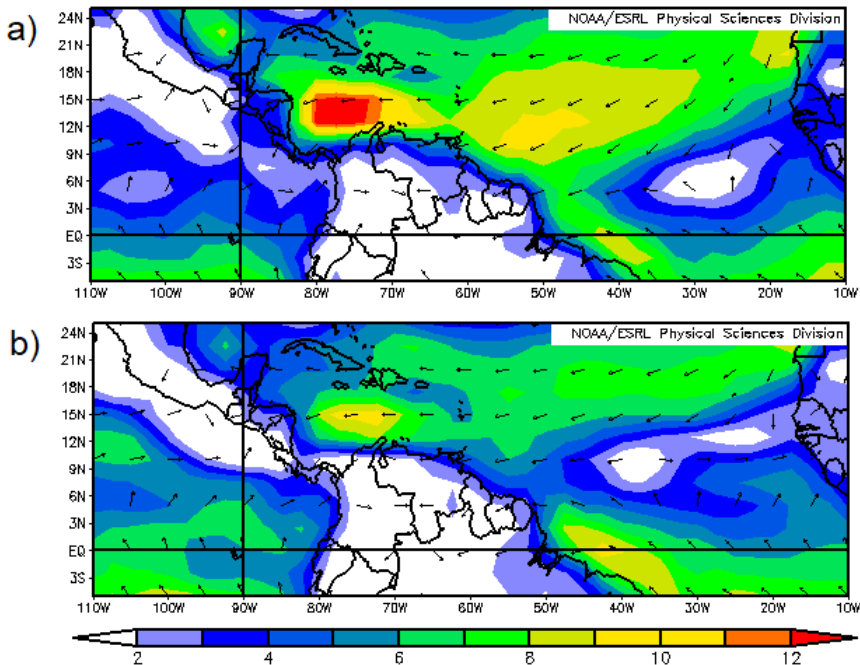


Figura 1. Promedio mensual de dirección y velocidad del viento superficial (m/s): a), junio – julio del 2014; b), agosto – septiembre del 2014.

Fuente: NOAA/ESRL Physical Sciences Division, Boulder Colorado en <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>

Durante junio y julio se presentaron las concentraciones de PM_{10} más bajas del año, a excepción de los días 26, 27 y 28 de junio. En este periodo se observa claramente un episodio de alta contaminación por PM_{10} (figura 2). En estos tres días, las concentraciones promedio diarias en Medellín fueron de 58, 104 y 82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, y de 85, 168 y 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Bogotá. En los medios locales, esta anomalía fue asociada con una intrusión de polvo del Sahara en las ciudades de estudio; sin embargo, a la fecha no se ha reportado ningún estudio que confirme esta hipótesis.

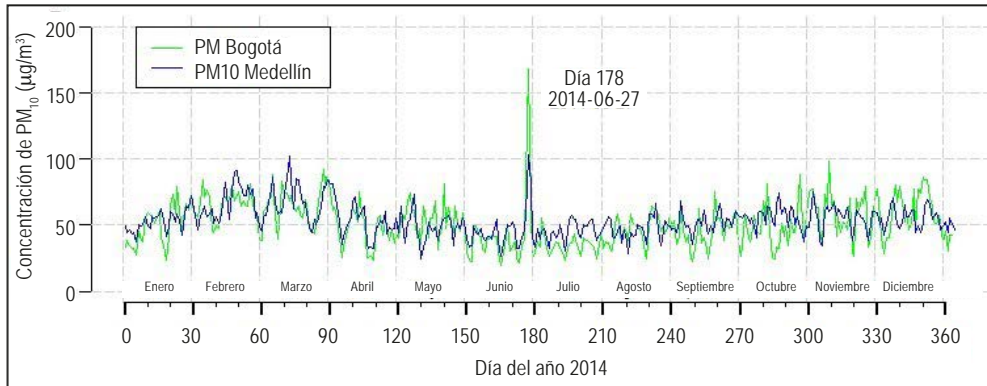


Figura 2. Serie temporal diaria de PM_{10} en Bogotá y Medellín durante el año 2014

Fuente: elaboración propia

La figura 3 presenta la relación entre las concentraciones de PM_{10} en Bogotá y PM_{10} en Medellín para dos periodos de tiempo. Como ambas variables no presentaron una distribución normal, el comportamiento del conjunto de variables fue descrito por una regresión polinomial local ponderada (Lowess) como prueba no paramétrica, y una regresión por mínimos cuadrados ordinarios (MCO) como estimador imparcial. Durante los meses de junio y julio del 2014 (figura 3a), las concentraciones de PM_{10} Bogotá y PM_{10} Medellín mantuvieron un coeficiente rho (correlación de Spearman) moderado de 0,63 con un nivel de significancia inferior a 0,001. Como se esperaba, al disminuir el rango de tiempo de análisis (14 días antes, durante y después de la intrusión de polvo del Sahara) el coeficiente de correlación aumentó a un valor moderado-alto de 0,78 (figura 3b). Estos resultados indican que la serie temporal de las concentraciones de PM_{10} presentó un comportamiento similar en ambas ciudades, concordando en un evento anómalo de concentración, a pesar de una distancia entre ciudades de aproximadamente 250 km.

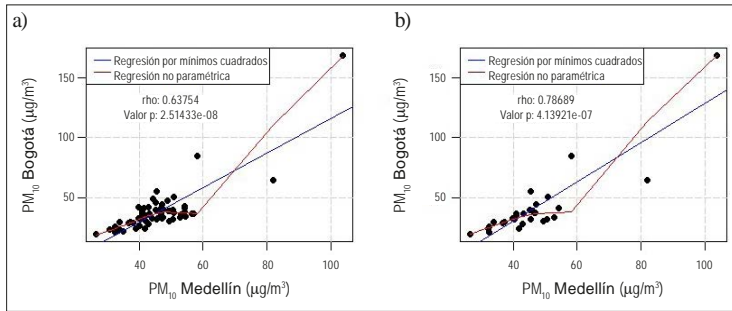


Figura 3. Relación entre concentraciones de PM₁₀ Bogotá y PM₁₀ Medellín a) meses junio y julio b) 14 días antes, durante y 14 días después de la intrusión de polvo del Sahara.

Fuente: elaboración propia

2.2 Análisis del transporte transatlántico de polvo sahariano e intrusión en Colombia a partir de Merra-2 y el modelo NMMB/BSC-Dust

La figura 4 muestra la distribución espacial de las fuentes de polvo sahariano (20 de junio del 2014). Los mayores valores de densidad másica de columna de polvo (>1009 kg/km²) se presentaron en la zona centro-occidental de Chad (región de Kanem, y Borkou, específicamente en la depresión de Bodele); en la zona suroriental de Níger (región de Zinder, Niffa y área suroriental de la región de Agadez); en la zona sur de Libia (Murzuq y Kufra); en la zona norte de Malí (región de Kidal y Tombuctú); y en la zona sur de Argelia (específicamente, en la provincia de Adrar).

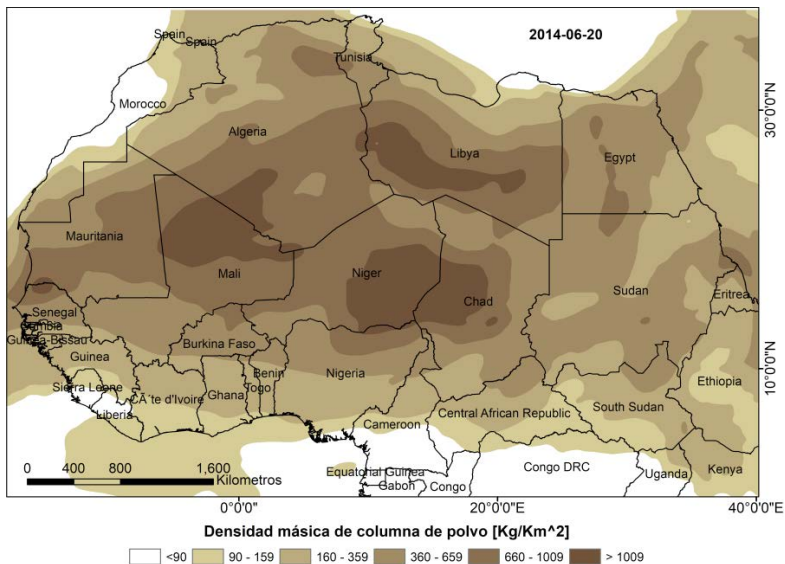


Figura 4. Fuente de polvo sahariano. Promedio de 24 horas con resolución espacial de 0,5 x 0,625°.

Fuente: elaboración propia a partir de datos del proyecto Merra-2.

La figura 6 muestra el transporte del polvo del Sahara antes, durante y después de su intrusión en Colombia. Según estos resultados, el polvo de África septentrional (proveniente en especial de Níger, Chad, Libia, Argelia y Malí), se dispersó sobre el Océano Atlántico tropical hasta llegar a Colombia.

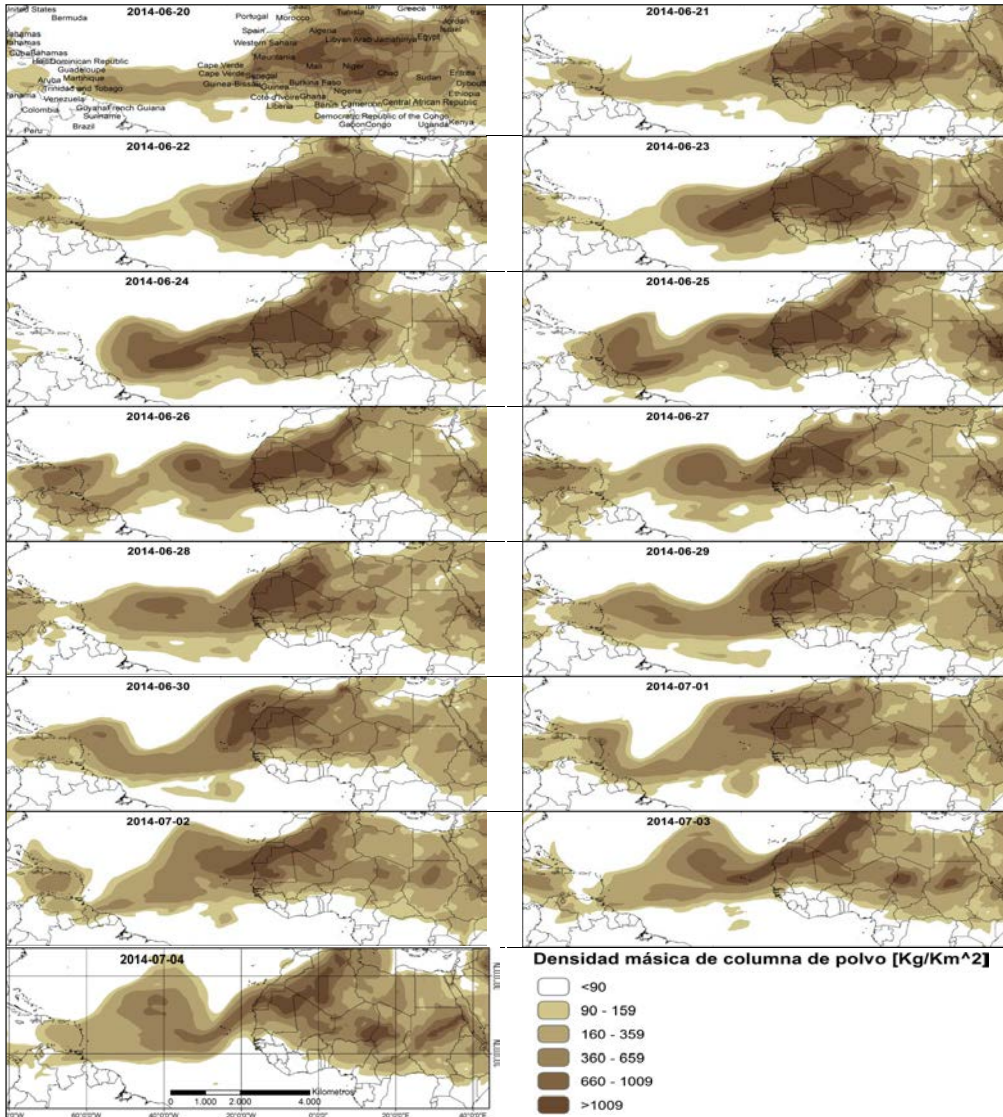


Figura 5. Transporte transatlántico de polvo africano desde el 20 de junio al 4 de julio de 2014.

Promedio de 24 horas con resolución espacial de $0,5 \times 0,625^\circ$

Fuente: elaboración propia a partir de datos del proyecto Merra-2

De acuerdo con los resultados obtenidos de Merra-2, el 27 de junio del 2014 se presentó una intrusión de polvo sahariano en aproximadamente el 95% del territorio nacional con un valor superior a 90 kg/km². El rango de 90-159 kg/km² en aproximadamente el 37%; de 160 kg/km²-359 kg/km² en aproximadamente el 57%, mientras que el mayor rango (360 kg/km²-659 kg/km² de densidad másica de columna de polvo) en aproximadamente el 1,5% del territorio colombiano.

Los departamentos colombianos que presentaron mayor rango de intrusión de polvo (360-659 kg/km²) en el día de estudio fueron (tabla 1) el Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, La Guajira, Atlántico, Bolívar, Sucre y Magdalena; mientras que los departamentos que presentaron menor rango de intrusión (menor a 90 kg/km²) fueron Nariño, Amazonas, Chocó, Cauca, Putumayo y Valle del Cauca.

Tabla 1. Intrusión de polvo africano en Colombia por departamento.

<i>Región natural</i>	<i>Departamento</i>	<i>Área departamental con intrusión de polvo (%)</i>	<i>Rango de densidad másica de columna de polvo (kg/km²)</i>
Insular	Archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina	60,4	360-659
		39,6	160-359
Caribe	Atlántico	48,2	360-659
		51,8	160-359
	Bolívar	11,1	360-659
		88,9	160-359
	Cesar	100	160-359
	Córdoba	100	160-359
	La Guajira	56,3	360-659
	43,7	160-359	
Magdalena		0,1	360-659
		99,9	160-359
Sucre		3,8	360-659
		96,2	160-359
Pacífica	Cauca	0,1	160-359
		95,1	90-159
		4,8	<90
	Chocó	36,3	160-359
		58,8	90-159
		4,9	<90
	Nariño	14,1	90-159
		85,9	<90
	Valle del Cauca	97,7	90-159
2,3		<90	

<i>Región natural</i>	<i>Departamento</i>	<i>Área departamental con intrusión de polvo (%)</i>	<i>Rango de densidad másica de columna de polvo (kg/km²)</i>
Andina	Antioquia	97,6 2,4	160-359 90-159
	Boyacá	74,5 25,5	160-359 90-159
	Caldas	55,0 45,0	160-359 90-159
	Cundinamarca	68,2 31,8	160-359 90-159
	Huila	58,7 41,3	160-359 90-159
	Norte de Santander	59,5 40,5	160-359 90-159
	Quindío	100	90-159
	Risaralda	100	90-159
	Santander	84,7 15,3	160-359 90-159
	Tolima	75,5 24,5	160-359 90-159
Orinoquia	Arauca	98,8 1,2	160-359 90-159
	Casanare	99,9 0,1	160-359 90-159
	Meta	99,6 0,4	160-359 90-159
	Vichada	92,3 7,7	160-359 90-159
Amazonia	Amazonas	81,4 18,6	90-159 <90
	Caquetá	56,1 43,9	160-359 90-159
	Guainía	3,7 96,3	160-359 90-159
	Guaviare	90,8 9,2	160-359 90-159
	Putumayo	15,5 80,2 4,3	160-359 90-159 <90
	Vaupés	1,5 98,5	160-359 90 - 159

Fuente: elaboración propia a partir de los datos de Merra-2

Los resultados del modelo NMMB/BSC-Dust muestran que el 27 de junio, desde las 00UTC, se presentó intrusión de polvo del Sahara en el norte y noreste de Colombia, validando los resultados obtenidos de Merra-2 y confirmando lo obtenido por Ramírez [10], en tanto la dirección de los vientos alisios (figura 6a) y la distribución de las isobaras (figura 6c) fueron causas de este fenómeno de transporte. A las 18 UTC, más de un 80% de la atmosfera del país estuvo cubierto por este material (figura 6a). Durante las horas estudiadas (00, 06, 12 y 18 UTC) del 27 de junio del 2014, las masas de aire que ingresaron al norte de Suramérica estuvieron por debajo de los 25 m/s a 700 hPa. De acuerdo con los resultados obtenidos del BSC-CNS, la nubosidad se encontró por debajo de los 2/8 de cielo cubierto en el tiempo de estudio.

Desde las 6UTC del 27 de junio se registró deposición seca de polvo en la región insular, al este de la región Caribe y norte de las regiones Andina y Orinoquia; la deposición húmeda se registró en la región Andina. El tiempo más crítico fue desde las 18 UTC, hora en la que se presentó deposición seca y húmeda en más de un 80% del territorio terrestre de Colombia (figura 6b). La deposición seca se presentó principalmente en las regiones Insular y Andina, mientras que la deposición húmeda lo hizo en las regiones de la Orinoquia y la Amazonia (figura 6b).

La máxima concentración de polvo en superficie se presentó a las 18 UTC, con un rango de 10 a 320 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (figura 6c). Las regiones más afectadas fueron Insular, Caribe, Andina, Orinoquia y Pacífico oriental. En las regiones de la Amazonia y del Pacífico occidental, las concentraciones fueron más bajas con respecto al resto del país, posiblemente a causa de precipitaciones registradas en estas zonas (figura 6c).

2.3 Rastreo del origen y trayectorias de masas de aire con Hysplit – NOAA

La figura 7 muestra la simulación del recorrido de las masas de aire que llegaron a Bogotá y Medellín el 27 de junio de 2014 a las 18 UTC para tres alturas de transporte intercontinental: 1000, 2000 y 3000 metros sobre el nivel de la tierra. Las retrotrayectorias se determinaron usando dos bases meteorológicas: GDAS (figura 7a) y Reanalysis (figura 7b). En estas figuras se observa que la mayor parte de las masas de aire partió del noroeste de África (Malí, Argelia y Níger, principalmente) y llegó a las ciudades de estudio. En estos puntos geográficos posiblemente se presentó deposición seca y húmeda (figura 6b). Los resultados de estas simulaciones confirman que el episodio de alta contaminación observado en Colombia a finales de junio del 2014 se debió a una intrusión de polvo del Sahara en la atmósfera de Colombia.

Los resultados obtenidos con GDAS a 1000 metros sobre el nivel de la tierra difieren de los resultados con Reanalysis (figura 7). Asimismo, los resultados obtenidos con dicha base concuerdan con los de Merra-2 (figura 5) y del Centro Nacional de

Supercomputación (BSC-CNS) (figura 6), lo que sugiere que las condiciones de la dinámica atmosférica de este evento está mejor representada por GDAS.

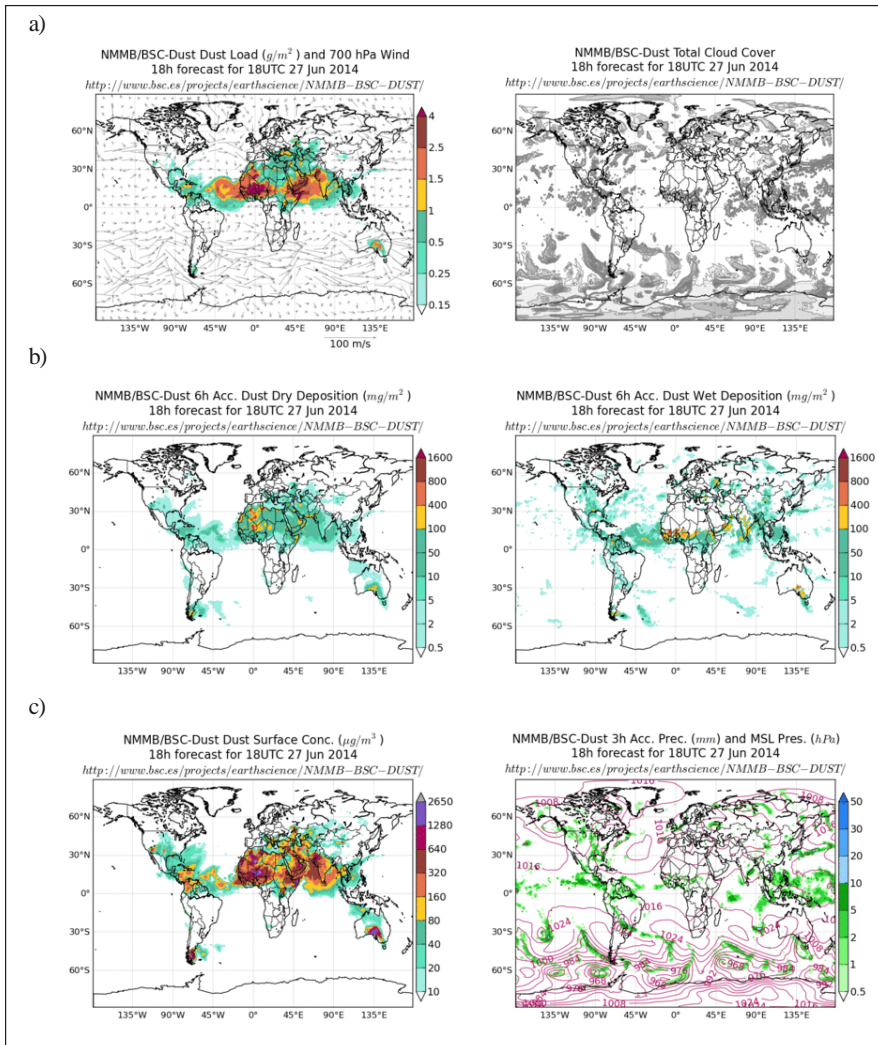


Figura 6. Intrusión de polvo sahariano en Colombia a las 18 UTC a) carga de polvo y nubosidad b) Deposición seca y húmeda de polvo c) concentración de polvo en superficie y precipitación acumulada de 3 horas y presión atmosférica.

Fuente: Centro Nacional de Supercomputación (BSC-CNS) [2]

2.4 Análisis de la distribución vertical de aerosoles con el sensor Caliop – Calipso

La figura 8 (esquina superior izquierda) muestra el recorrido de análisis del sensor Caliop (línea continua en azul) sobre Suramérica y el Caribe el 27 de junio de 2014.

El perfil vertical de aerosoles en Colombia muestra, en los primeros 4 km de altitud, presencia principalmente de polvo (puro y contaminado) y, en menor medida, de aerosoles marinos y por combustión. Entre los 5 y 14 km de altitud se evidencia polvo mineral a lo largo del trayecto de análisis del sensor Caliop.

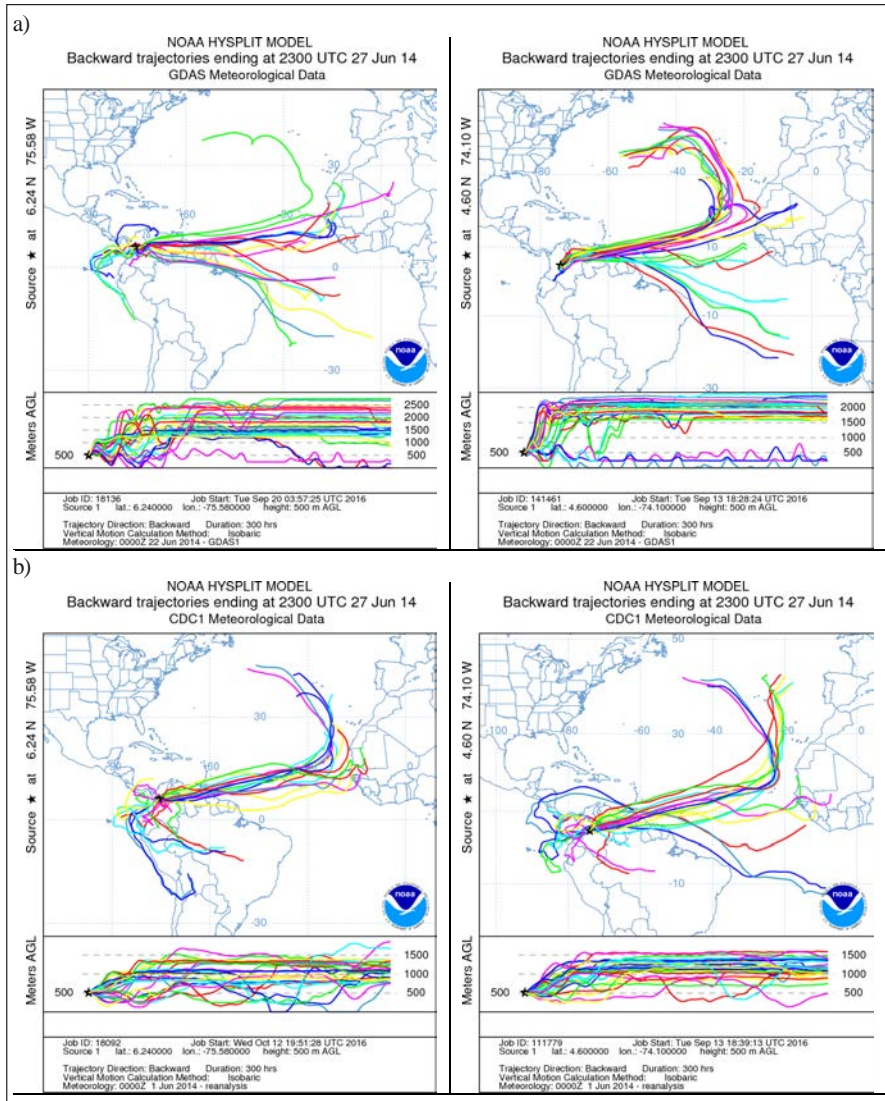


Figura 7. Origen de trayectorias de masas de aire con Hysplit (múltiples corrientes atmosféricas) para el 27 de junio de 2014 a) base meteorológica GDAS1°, b) base meteorológica Reanalysis. Los puntos de finalización son el aeropuerto de Medellín (columna izquierda) y aeropuerto de Bogotá (columna derecha) a las 23 UTC a 500 metros sobre el nivel del suelo.

Fuente: elaboración propia

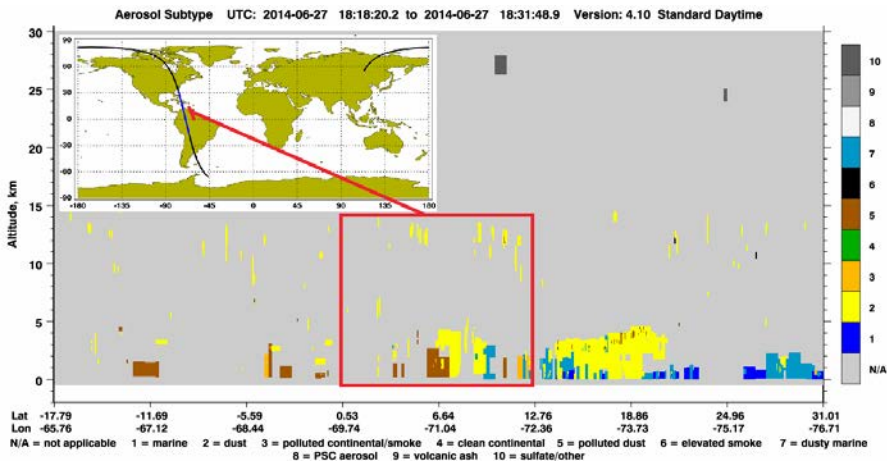


Figura 8. Perfil vertical del tipo de aerosol mediante el sensor Caliop – Calipso para el 27 de junio de 2014. El cuadrado representa la parte del trayecto del sensor Caliop sobre Colombia.

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

En este artículo se analizó y determinó la relación entre las emisiones de polvo del Sahara y un episodio de alta contaminación que se registró en Colombia a finales de junio de 2014. Para establecer esta relación se emplearon diferentes fuentes de información y herramientas disponibles tales como datos de monitorización de calidad del aire en superficie, monitorización satelital y resultados de modelos globales.

Adicionalmente, se implementó el modelo lagrangiano Hysplit para determinar los orígenes y las trayectorias de las masas de aire presentes durante el episodio.

Al analizar los datos medidos por las redes de calidad del aire de Bogotá y Medellín se observa con claridad que se presentó un episodio atípico de alta contaminación a finales de junio del 2014. Un análisis estadístico indicó que las concentraciones de PM_{10} medidas en Bogotá y Medellín coinciden en su comportamiento y, por tanto, están relacionadas. Tanto el análisis de la densidad másica de columna de polvo del proyecto Merra-2, como los resultados del modelo NMMB/BSC-Dust, y las simulaciones realizadas con Hysplit confirman que el episodio de alta contaminación se debió una intrusión atípica de polvo del Sahara en el aire ambiente de Colombia. Esta intrusión cubrió el 95% del territorio nacional, siendo la región Caribe la más afectada. Hasta donde se sabe, esta es la primera vez que se registra la presencia de polvo africano en el aire ambiente de grandes ciudades colombianas. Es necesario continuar con la monitorización y el análisis de este tipo de eventos y, en particular, se requiere determinar las causas de este fenómeno.

REFERENCIAS

- [1] J. I. G. C. Álvarez Uriarte, “Evaluación de la contaminación atmosférica por metales en la atmósfera urbana de Bilbao: distribución sobre las partículas en suspensión y correlación con otros contaminantes de referencia”, *3ª Jorn. Técnica sobre Contam. atmosférica*, pp. 1–9, 2008.
- [2] J. Bedoya and E. Martínez, “Calidad del aire en el Valle de Aburrá. Antioquia Colombia”, *Rev. Dina*, vol. 158, pp. 7–15, 2008.
- [3] M. Z. Jacobson, *Fundamentals of Atmospheric Modeling*, vol. 53, n.º 2. 2013.
- [4] Y. Shao *et al.*, “Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science”, *Aeolian Res.*, vol. 2, n.º 4, pp. 181–204, 2011.
- [5] P. Dorta *et al.*, “Frecuencia, estacionalidad y tendencias de las advecciones de aire sahariano en Canarias (1976-2003)”, *Investig. Geográficas*, vol. 38, pp. 23-45, 2005.
- [6] University Corporation for Atmospheric Research, “Pronóstico de tormentas de polvo”, 2009. [Online]. Available: http://www.goes-r.gov/users/comet/mesoprim/dust_es/print.htm. [Accessed: 01-Dec-2016].
- [7] E. M. López *et al.*, “Nubes de polvo del Sahara: Su impacto en el tiempo, clima y salud, su presencia en Cuba, Resumen Introducción”, *Rev. Cuba. Meteorol.*, vol. 20, pp. 120–134, 2006.
- [8] O. J. Ramírez Hernández, “Intrusiones de polvo africano en la región Caribe de Colombia”, *Gestión y Ambiente*, vol. 17, n.º 2, pp. 11–29, 2014.
- [9] H. Yu *et al.*, “The fertilizing role of African dust in the Amazon rainforest: A first multiyear assessment based on data from Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observations”, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 42, n.º 6, pp. 1984–1991, 2015.
- [10] A. Gioda, U. Pérez, Z. Rosa, and B. D. Jiménez-Vélez, “Particulate Matter (Pm 10 and Pm 2 . 5) From Different Areas of Puerto Rico”, *Fresenius Environ. Bull.*, vol. 16, n.º 8, pp. 861–868, 2007.
- [11] D. Poleo and J. Briceno-Castillo, “The intrusion of Saharan dust in the atmospheric boundary layer of the Caribbean Sea: episode of August 2013”, *Tópicos Meteorológicos y Ocean*, n.º 2, pp. 68–89, 2014.
- [12] K. Gyan *et al.*, “African dust clouds are associated with increased paediatric asthma accident and emergency admissions on the Caribbean island of Trinidad”, *Int. J. Biometeorol.*, vol. 49, n.º 6, pp. 371–376, 2005.
- [13] EarthDATA NASA, “Giovanni”, v. 4.21.6. [Online]. Available: <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>. [Accessed: 01-Dec-2016].
- [14] S. Shen, D. Ostrenga, and B. Vollmer, “Long-Term Global Aerosol Products from NASA Reanalysis Merra-2 Available at GES DISC”, *Am. Geophys. Union, Fall Meet. 2015, Abstr. #A31D-0095*, 2015.
- [15] G. Visconti, *Fundamentals of physics and chemistry of the atmosphere*. Berlin: Springer, 2001.
- [16] E. Weisstein, “Column Mass Density”, 2007. [Online]. Available: <http://scienceworld.wolfram.com/physics/ColumnMassDensity.html>. [Accessed: 01-Dec-2016].

- [17] C. Pérez *et al.*, “Atmospheric dust modeling from meso to global scales with the online NMMB/BSC-Dust model – Part 1: Model description, annual simulations and evaluation”, *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 11, n.º 24, pp. 13001–13027, 2011.
- [18] S. C. Barcelona, “Barcelona Supercomputing Center-Centro Nacional de Supercomputación”, 2004. [Online]. Available: http://www.bsc.es/ESS/nmmmb_bsc-dust/global/forecast. [Accessed: 01-Dec-2016].
- [19] C. S. Zender, R. L. Miller, and I. Tegen, “Quantifying mineral dust mass budgets: terminology, constrains, and current estimates”, *Eos (Washington. DC)*, vol. 85, n.º 48, pp. 509–512, 2004.
- [20] A. F. Stein, R. R. Draxler, G. D. Rolph, B. J. B. Stunder, M. D. Cohen, and F. Ngan, “NOAA’s Hysplit Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System”, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 96, n.º 12, pp. 2059–2077, Dec. 2015.
- [21] Ideam, “Fenómeno El Niño y La Niña”, *Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales*, 2014. [Online]. Available: <http://www.pronosticosyalertas.gov.co/pronosticos-alertas/fenomenos-el-nino-y-la-nina>. [Accessed: 01-Dec-2016].