

# Simulación de la dispersión del material particulado proveniente de actividades portuarias en Santa Marta

ELIANA VERGARA VÁSQUEZ<sup>1</sup>

FRANCISCO GARCÍA RENTERÍA<sup>2</sup>

## RESUMEN

Santa Marta, uno de los principales destinos turísticos en el Caribe colombiano con un importante asentamiento poblacional, presenta episodios de contaminación de la calidad del aire. En esta investigación se determinó la variación espacio-temporal del material particulado suspendido (PST) y de la fracción respirable ( $PM_{10}$ ) generada por la actividad portuaria en Santa Marta, utilizando muestreadores de alto volumen (Hi-Vol) y la metodología estándar EPA 40 CFR Pt. 50 App. B y EPA 40 CFR Pt. 50 App. J. La dispersión de los contaminantes, en términos de concentración, se estimó utilizando los modelos de dispersión Industrial Source Complex Short Term (ISCST) y Offshore Coastal Dispersión (OCD). Se concluyó que en Santa Marta existe la ocurrencia de niveles violatorios para PST y  $PM_{10}$  con concentraciones predominantes en el norte y sur de la ciudad.

**Palabras clave:** material particulado, Santa Marta, puertos, ISC y OCD.

<sup>1</sup> Ingeniera ambiental y sanitaria. Candidata a Magíster en Ciencias Ambientales. Docente de la Corporación Universidad de la Costa, Barranquilla, Colombia. Correo electrónico: evergara6@cuc.edu.co

<sup>2</sup> Ingeniero sanitario. Magíster en Ingeniería Ambiental. Candidato a doctor en Ingeniería. Docente de la Universidad del Magdalena, Santa Marta, Colombia. Correo electrónico: fcofdogarcia@yahoo.com

FECHA DE RECEPCIÓN: 25 DE JUNIO DEL 2013 • FECHA DE APROBACIÓN: 5 DE NOVIEMBRE DEL 2013

Cómo citar este artículo: Vergara Vásquez, E. y García Rentería, F. (2013). Simulación de la dispersión del material particulado proveniente de actividades portuarias en Santa Marta. *Épsilon* (21), 41-55.

## *Simulation of Dispersion of Particulate Matter Resulting from Port Activities in Santa Marta*

### ABSTRACT

The air in Santa Marta, one of the main tourist destinations in the Colombian Caribbean, and a city with a significant population settlement, shows signs of pollution. The present research determined the time-space variation of suspended particulate matter (SPT) and of the breathable fraction ( $PM_{10}$ ) generated by the port activity in Santa Marta, using high volume samplers (Hi-Vol) and the standard EPA 40 CFR Pt. 50 App. B and EPA 40 CFR Pt. 50 App. J methodology. The dispersion of pollutants, in terms of concentration, was estimated using the Industrial Source Complex Short Term (ISCST) and Offshore Coastal Dispersion (OCD) models. Results show that Santa Marta is in violation of threshold levels for PST and  $PM_{10}$  with concentrations predominantly in the city's north and south.

**Keywords:** Particulate Matter, Santa Marta, Ports, ISC and OCD.

---

## *Simulação da dispersão do material particulado proveniente de atividades portuárias em Santa Marta*

### RESUMO

Santa Marta, um dos principais destinos turísticos no Caribe colombiano com um importante assentamento populacional, apresenta episódios de contaminação da qualidade do ar. Nesta pesquisa foi determinada a variação espaço-temporal do material particulado suspenso (PST) e da fração respirável ( $PM_{10}$ ) gerada pela atividade portuária em Santa Marta, utilizando mostradores de alto volume (Hi-Vol) e a metodologia padrão EPA 40 CFR Pt. 50 App. B e EPA 40 CFR Pt. 50 App. J. A dispersão dos poluentes, em termos de concentração, estimou-se utilizando os modelos de dispersão Industrial Source Complex Short Term (ISCST) e Offshore Coastal Dispersão (OCD). Concluiu-se que em Santa Marta existe a ocorrência de níveis violativos para PST e  $PM_{10}$  com concentrações predominantes no norte e sul da cidade.

**Palavras chave:** material particulado, Santa Marta, portos, ISC e OCD.

## Introducción

Los impactos que las partículas atmosféricas tienen en la salud humana dependen de su tamaño y de su composición (Perrone *et al.*, 2006), también dependerán de su concentración en masa y del lugar en el cual se depositen en las vías respiratorias (Park *et al.*, 2009). Estudios epidemiológicos han establecido una asociación entre concentración de partículas en el medio ambiente y los efectos adversos en la salud (Díaz-Robles *et al.*, 2008; Arciniegas, 2012). Evidencias sugieren que la exposición por largo tiempo al material particulado contribuye al estrés en el sistema oxidativo y pulmonar, inflamaciones, arteriosclerosis progresiva y riesgos de enfermedad isquémica del corazón y muerte (Pope y Dockery, 2006). También puede inducir la inflamación de los pulmones, lo que podría causar estrés cardiovascular (Riediker *et al.*, 2004). En el plano ambiental, la deposición del material particulado atmosférico puede suponer la acidificación y eutrofización de suelos y aguas superficiales, lo cual a su vez puede repercutir sobre la composición de las aguas subterráneas (Viana, 2003).

Para calcular las concentraciones de contaminantes en el aire se están utilizando modelos de dispersión, los cuales facilitan las relaciones críticas entre las emisiones procedentes de fuentes naturales y antrópicas (Ozkaynak *et al.*, 2009). Estos modelos utilizan ecuaciones matemáticas y describen la atmósfera, la dispersión y procesos químicos y físicos dentro de la pluma, para calcular las concentraciones en distintas áreas (Holmes y Morawska, 2006). Tales modelos permiten la predicción espacial para mostrar gradientes importantes en la contaminación del aire (Sahu *et al.*, 2006), y su aplicabilidad depende en gran medida de la naturaleza de la concentración. Uno de los más utilizados en calidad del aire es el Industrial Source Complex (ISC), que se basa en la línea recta y ecuación gaussiana de la pluma en estado estacionario y permite modelar un amplio rango de fuentes (puntuales, de volumen, de área y de foso abierto), estimando el valor de concentración o deposición para cada fuente y combinación de receptores (EPA, 1995; Abdul, 2004). Este modelo ha sido aplicado para estimaciones de contaminantes atmosféricos en la India (Bhanarkar, 2005), Pekín (Hao *et al.*, 2000) y Buenos Aires (Venegas y Mazzeo, 2006), y dentro de sus principales ventajas se encuentra que puede ser usado para contaminantes primarios y emisiones continuas de contaminantes tóxicos y peligrosos; puede manejar múltiples fuentes, incluyendo las de tipo puntual, área, volumen y lineales; las tasas de emisión pueden ser constantes o variadas por mes, estación, hora del día u otro periodo opcional (Benavides, 2003). Otros

modelos acoplan la interfaz agua-tierra y permiten hacer predicciones en zonas costeras cerca de la fuente, uno de estos es el *offshore costal dispersion* (OCD), este es un modelo de dispersión gaussiano, desarrollado para determinar el impacto de las fuentes ubicadas fuera de la costa, puntuales, lineales o de área, sobre la calidad del aire de las regiones costeras (Martin, 2006). Fue desarrollado por el Servicio de Gestión de Minerales (MMS, por sus siglas en inglés) para determinar el impacto de las emisiones en alta mar y en tierra procedentes de las fuentes puntuales, en la calidad del aire de las regiones costeras. El modelo OCD es una adaptación del modelo *multiple point source model with terrain* (MPTER), directriz de la Environmental Protection Agency (EPA).

Santa Marta es una ciudad que se encuentra ubicada en el margen costero de Colombia, se caracteriza por la presencia de puertos carboníferos en los cuales se lleva a cabo el manejo del carbón proveniente de las minas del Cesar y La Guajira, el cual, luego de ser transportado en tractocamiones o trenes, se acopia, almacena y se carga en barcos para su destino final. En estas actividades se emite material particulado al ambiente de manera fugitiva o influenciada por parámetros meteorológicos como la velocidad del viento, entre otros. Aunado a esto, se presentan otras fuentes como el parque automotor, el auge del mototaxismo, el aerosol marino y la erosión eólica que resuspende polvo desde los cerros de la ciudad que permanecen denudados la mayor parte del año, fuentes a las cuales se les atribuye el deterioro de la calidad del aire de la ciudad.

Debido a las deficiencias existentes en algunas operaciones portuarias en lo relacionado con la minimización de emisión de material particulado, el Gobierno expidió el Decreto 3083 del 15 de agosto del 2007, que obliga a todos los puertos marítimos del país hacer el descargue del carbón en naves de forma directa, utilizando bandas transportadoras encapsuladas o utilizando otro sistema equivalente y recurriendo a mejores prácticas y a tecnologías limpias que eviten la dispersión de partículas, incluyendo sistemas de humectación eficientes, control de altura de pilas de almacenamiento y descarga de carbón, entre otras. Medida importante si tenemos en cuenta que en la ciudad de Santa Marta circulan aproximadamente 500 tractocamiones que transportan individualmente un volumen de carga de 35 toneladas diarias, las cuales son llevadas hasta los diferentes puertos, por lo que esta actividad se convierte con las antes mencionadas en fuente importante de emisión de material particulado a la atmósfera. La situación se torna preocupante al saber que para el 2009 estos puertos exportaron 42 millones de toneladas de carbón, y

se espera que la cantidad de carbón por exportar aumente por el montaje de nueva infraestructura en los puertos existentes y la entrada en operación de un nuevo puerto denominado Puerto Nuevo, lo que indica mayor potencial de actividades y consiguientemente, mayor emisión de material particulado al ambiente de la ciudad.

Teniendo en cuenta lo planteado, es necesario estudiar cuál es la contribución de las actividades portuarias y el transporte a los niveles de material particulado en Santa Marta, debido a que existe una falencia de información que corrobore el grado en que se encuentra expuesta la ciudad, relacionado con las emisiones de material particulado generado por estas actividades. Además, se desconoce la distribución espacial y temporal de este contaminante que permita generar alternativas de solución para mejorar las actividades portuarias y disminuir los niveles de emisión que podrían estar sobrepasando los niveles permisibles, ello permitiría implementar las medidas sanitarias correspondientes para mitigar o prevenir impactos negativos de la actividad portuaria en la calidad del aire de la ciudad de Santa Marta.

## **Metodología**

### ***Área de estudio***

La ciudad de Santa Marta bordea el sector oriental de la bahía que lleva su nombre en el mar Caribe. Está situada entre los 11°14'50" de latitud norte y los 74°12'06" de longitud occidental, a una altura de 6 metros sobre el nivel del mar (figura 1). Posee un clima cálido y seco, con precipitación media anual de 362 mm, humedad relativa de 77 % y rango de temperatura entre los 23-32 °C, la dirección predominante del viento es hacia el oriente con un 55 %, y la distribución de las velocidades muestra un rango entre 0 y 1 m/s con una frecuencia del 20 % y un 19 % y 10 % de frecuencia para las velocidades en los rangos entre 1 y 2 m/s y de 2 a 3 m/s. Las lluvias siguen un patrón monomodal, con precipitaciones concentradas en los periodos de junio-julio y septiembre-octubre, y un periodo seco de diciembre-abril (García *et al.*, 2006).

### ***Localización de la estación de muestreo***

Para el desarrollo de esta investigación se localizaron las siguientes estaciones de monitoreo (sus coordenadas se muestran en la tabla 1).

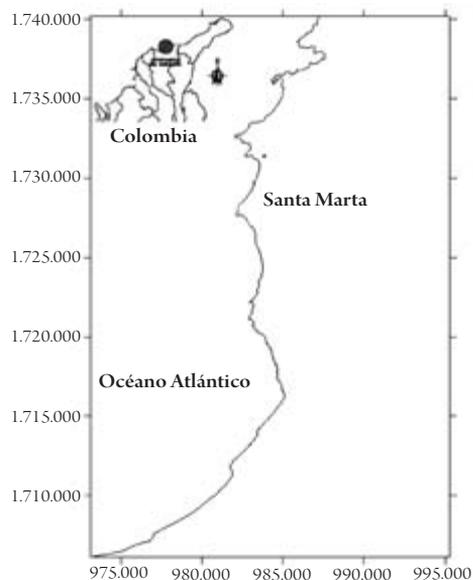


Figura 1. Localización del área de estudio

Fuente: García *et al.* (2006).

Tabla 1. Coordenadas de las estaciones

| ESTACIÓN | UBICACIÓN                 | COORDENADAS   |               |
|----------|---------------------------|---------------|---------------|
|          |                           | NORTE         | ESTE          |
| Almendo  | Almendo                   | 987.244,438   | 1.735.980,13  |
| Espa     | Gaira                     | 9.846.558,410 | 17.289.990,30 |
| Unimag   | Universidad del Magdalena | 987.998,332   | 1.733.349,69  |
| Zalesa   | Mamatoco                  | 990.557,875   | 1.732.983,375 |

Fuente: elaboración propia.

### **Método de muestreo**

Se utilizaron muestreadores de alto volumen Hi-Vol (Termo Environmental Instrument), equipados con una bomba que succiona un volumen de aire que varía entre 1,12 y 1,70 m<sup>3</sup>/min. El medidor de alto volumen dispone de un portafiltros, un flujómetro y un controlador de tiempo. Siguiendo el estándar EPA 40 CFR Pt. 50 App. B y EPA 40 CFR Pt. 50 App. J, se colectaron muestras diarias en un periodo de 24 horas en filtros de fibra de vidrio y cuarzo de 20,3 × 25,4 cm; estos fueron

pesados antes y después del muestreo. La concentración de partículas respirables ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en el aire se calculó dividiendo la diferencia de masa de partículas colectadas en el filtro y el volumen de aire muestreado durante  $24 \pm 1$  hora.

### Simulación de la dispersión

El análisis de la dispersión de partículas en terreno se efectuó mediante el modelo de simulación complejo de fuente industrial (ISC), *software* desarrollado por la EPA, con el cual se estima la dispersión de contaminantes en términos de concentración. La base del modelo es la ecuación gaussiana (1) relacionada a continuación:

$$x = \frac{Q * K * V * D}{2\pi * u_s * \sigma_y * \sigma_z} * \exp\left[-0,5\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \quad (1)$$

Donde:

$Q$  = tasa de emisión del contaminante

$K$  = coeficiente de escalamiento para convertir (g/s) en ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

$V$  = término vertical

$D$  = término de decaimiento

$\sigma_y$  = desviación estándar de distribución de concentración lateral

$\sigma_z$  = desviación estándar de distribución de concentración vertical

$u_s$  = velocidad media del viento a la altura de la chimenea en m/s

En este caso se simuló una fuente de área asociada con el descargue del material en la barcaza, utilizando el factor de emisión correspondiente a la acción de carga o descarga del mineral, por medio del cual se cuantificó el material particulado, producto de la transferencia. La fórmula del factor de emisión fue obtenida del capítulo 13.2 de la *Compilation of Air Pollutant Emission Factors* (2).

$$FE = k * 0,0016 * \left(\frac{U}{2,2}\right)^{1,3} * \left(\frac{M}{2}\right)^{-1,4} \quad (2)$$

Donde:

$FE$ : factor de emisión por la descarga de material en kg/t

$k$ : factor de corrección por el tamaño de la partícula (para PTS es 0,74 y para  $\text{PM}_{10}$  es 0,35).

$U$ : velocidad del viento en m/s

$M$ : contenido de humedad del material en porcentaje

Los datos meteorológicos para alimentar el modelo fueron tomados de la estación Aeropuerto Simón Bolívar de la red del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (Ideam). Para determinar la contribución de la interfaz agua-tierra se utilizó el modelo OCD cuya base es la ecuación gaussiana (1), para esta modelación se tomó una fuente de área. El modelo OCD es una adaptación del modelo MPTER, directriz de la EPA. Requiere datos meteorológicos para dos lugares: en continente (*overland*) y en el océano (*overwater*). Las mediciones sobre el *overwater* incluyen la dirección y velocidad del viento, la altura de mezcla, la temperatura del aire sobre el agua y la humedad relativa. Los datos de *overland* incluirán requisitos de la Users' Network for Applied Modeling of Air Pollution (Unamap) de la norma modelo EPA. La información meteorológica sobre la superficie del agua fue extractada del nivel superficial del reanálisis de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)<sup>3</sup> para datos 4 veces al día (cada 6 horas). Para llenar los vacíos de información y pasar de datos cada 6 horas a datos horarios, se usó la opción OCDPRO del modelo que permite construir la información meteorológica sobre el agua para datos con información faltante en periodos menores a 6 horas.

### **Validación de los modelos complejo de fuente industrial y offshore costal dispersion**

Para validar los resultados obtenidos por los modelos se utilizó la determinación del error entre los datos de las series de tiempo de las mediciones, y las simulaciones realizadas mediante la utilización de los modelos ISC y OCD se determinaron mediante la cuantificación del error de la raíz media cuadrática RMS (3).

$$RMS = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\zeta_m - \zeta_d]^2 \right\}^{1/2} \quad (3)$$

Donde:

$\zeta_m$  = valores medidos con los equipos

3 Recuperada del sitio electrónico <http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.surface.html>.

$\zeta_d$  = valores obtenidos mediante el modelo

$N$  = número de datos horarios con que cuentan las series de tiempo y  $\zeta_d$ .

Corresponde a la a media temporal de las concentraciones simuladas.

Errores hasta el 5 % se consideran ideales; entre el 6 y el 10, buenos; y entre el 11 y el 20, aceptables (Días y López, 2006).

## Resultados y análisis

### Resultado de mediciones

En las tablas 2 y 3 se muestra un resumen estadístico de los datos de concentración calculados de  $PST$  y  $PM_{10}$  durante el muestreo.

Tabla 2. Resumen de las estaciones de medición de  $PST$

| ESTACIÓN | MIN.<br>$\mu\text{g}/\text{m}^3$ | MAX.<br>$\mu\text{g}/\text{m}^3$ | PROMEDIO<br>GEOMÉTRI-<br>CO $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | MEDIA GEOMÉTRICA<br>98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |              | LÍMITE DIARIO<br>295 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |              |
|----------|----------------------------------|----------------------------------|--|---|--------------|---|--------------|
|          |                                  |                                  |  | CUMPLE  | NO<br>CUMPLE | CUMPLE  | NO<br>CUMPLE |
| ESPA     | 90                               | 298                              | 129,33   |   | X            |   | X            |
| Zalesa   | 119                              | 381                              | 205  |   | X            |   | X            |
| Almendro | 59                               | 233                              | 124,72   |   | X            | X   |              |
| Unimag   | 45                               | 264                              | 120  |   | X            | X   |              |

Nota: el valor estándar de la media geométrica y el límite diario son establecidos bajo condiciones de referencia 754 mm Hg y 28 °C.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3. Resumen de las estaciones de medición de  $PM_{10}$

| ESTACIÓN | MIN.<br>$\mu\text{g}/\text{m}^3$ | MAX.<br>$\mu\text{g}/\text{m}^3$ | PROMEDIO<br>ARITMÉTICO<br>$\mu\text{g}/\text{m}^3$ | MEDIA ARITMÉTICA<br>49 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |              | LÍMITE DIARIO<br>98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |              |
|----------|----------------------------------|----------------------------------|--|---|--------------|--|--------------|
|          |                                  |                                  |  | CUMPLE  | NO<br>CUMPLE | CUMPLE                                       | NO<br>CUMPLE |
| ESPA     | 26                               | 114                              | 61,59  |   | X            |  | X            |
| Zalesa   | 20                               | 221                              | 115  |   | X            |  | X            |
| Almendro | 21                               | 98                               | 57   |   | X            | X  |              |
| Unimag   | 21                               | 86                               | 49   | X   |              | X  |              |

Nota: el valor estándar de la media geométrica y el límite diario son establecidos bajo condiciones de referencia 754 mmHg y 28 °C.

Fuente: elaboración propia.

## Simulación de la dispersión de material particulado

En la figura 2 se presenta la variación espacial de las concentraciones de PST y  $PM_{10}$  para las actividades realizadas en los puertos en Santa Marta de acuerdo con los resultados del modelo ISC. La gráfica de las isopletas muestra que las mayores concentraciones de PTS y  $PM_{10}$  se presentaron al norte de la ciudad. Se aprecia que las concentraciones van declinando, siguiendo un patrón de dispersión hacia el noroeste, influenciadas por la dirección del viento. Se observa que las concentraciones para esta fuente son superiores a los  $300 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , tanto para PST como para  $PM_{10}$ .

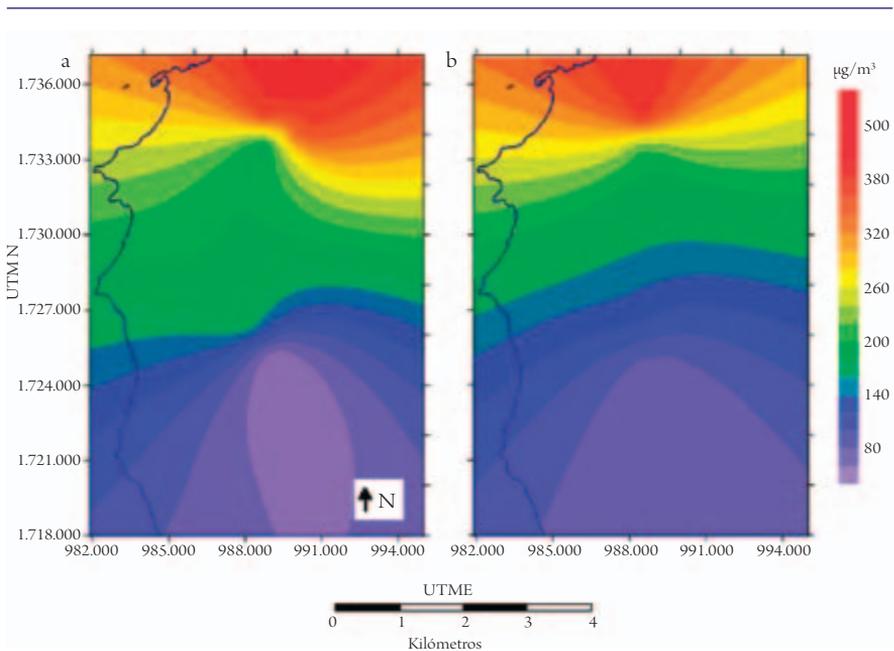


Figura 2. Distribución espacial de la concentración de material particulado proveniente de los puertos en Santa Marta. a) PST (izquierda), b)  $PM_{10}$  (derecha)

Fuente: elaboración propia.

Para determinar la influencia de la interfaz agua-tierra, se trabajó con el modelo OCD; este reportó las concentraciones de  $PM_{10}$  para 2 semestres del año, para el primero (enero a junio), las concentraciones disminuyeron hacia las direcciones oeste y este, teniendo en cuenta parámetros meteorológicos como la velocidad y dirección del viento. Se observó que la dispersión fue mayor en el norte de la ciudad. Por su parte, las concentraciones de PST en este mismo semestre presentaron una tendencia muy

parecida a las concentraciones de  $PM_{10}$ ; disminuyeron en la dirección norte-sur. Las concentraciones de PST y  $PM_{10}$  para el segundo semestre (julio a diciembre) no sobrepasaron los  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; se aprecia que las concentraciones de estos parámetros declinaron, siguiendo un patrón de dispersión hacia el noreste (figura 3).

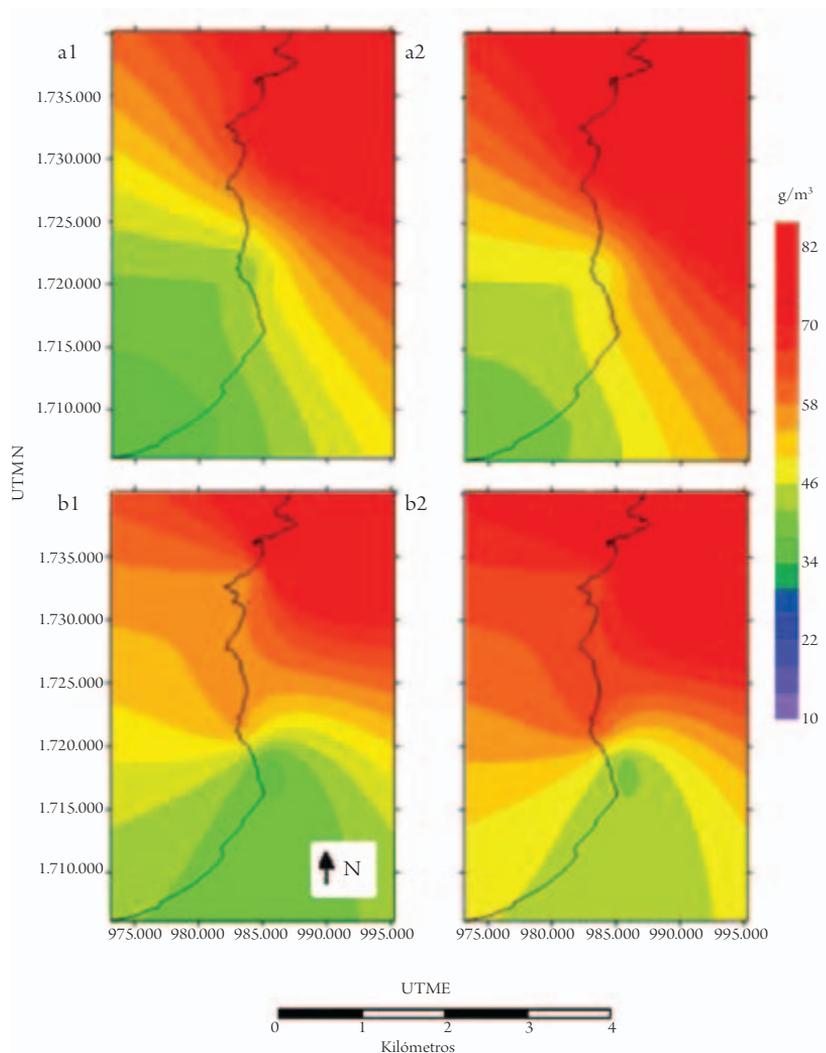


Figura 3. Distribución espacial de la concentración de material particulado en Santa Marta. a1)  $PM_{10}$  primer semestre, a2)  $PM_{10}$  segundo semestre, b1) PST primer semestre y b2) PST segundo semestre

Fuente: elaboración propia.

## ***Validación de los resultados de los modelos complejo de fuente industrial y offshore costal dispersion***

La comparación entre las concentraciones medidas y simuladas se efectuó para el mismo punto, donde se ubicaron las estaciones de monitoreo, y para las fechas de las mediciones efectuadas, al aplicar el modelo RMS para la validación de los datos obtenidos en campo y los generados por los modelos, se obtuvieron valores de 9 % para cada uno de los modelos, dato que se encuentra ubicado en un rango bueno según lo establecido por los autores Dias y López (2006).

### **Discusión**

Los resultados obtenidos con los modelos ISC y OCD demuestran que el material particulado PST y  $PM_{10}$  presenta un patrón bimodal, con concentraciones predominantes al norte y sur de la ciudad, siendo estas las mayores áreas de influencia de estos parámetros. Esta situación es atribuible a las actividades diarias en los puertos, las cuales generan emisiones constantes de este contaminante, a lo cual se suma el incremento de la infraestructura portuaria y el aumento significativo del parque automotor. Con las simulaciones realizadas, se compararon los datos recolectados en campo y los arrojados por el modelo, lo que permitió corroborar su asertividad para este tipo de estudios.

En ninguna de las estaciones monitoreadas, se cumple con el criterio de calidad de la media geométrica anual para PST. Todas registraron medias geométricas anuales superiores a  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Los límites diarios de PST se cumplen en todas las estaciones menos en ESPA y Zalesa. En lo referente a las concentraciones de  $PM_{10}$ , se encontró que las estaciones ESPA y Zalesa no cumplen con los criterios de calidad referenciados por la normatividad, debido a que se violan los límites diarios y anuales permisibles. Se evidencia que en estas zonas de la ciudad, se presentan altos niveles de concentración de partículas tanto respirables como gruesas ( $PM_{10}$  y PST); pese a ello, la calidad atmosférica no está siendo monitoreada por las autoridades ambientales, dado que en su área de influencia no hay estaciones de la red de calidad del aire.

## Conclusiones

Los resultados obtenidos con los modelos ISC y OCD demuestran que los materiales particulados PST y  $PM_{10}$  presentan concentraciones predominantes al norte y sur de la ciudad, siendo estas las mayores áreas de influencia de estos parámetros. La estimación del error entre los datos medidos y simulados efectuadas mediante el RMS mostró que el acercamiento de los datos predichos por los modelos es aceptable frente a las mediciones obtenidas. Los valores de los errores obtenidos, 9 %, confirman que estas herramientas, una vez calibradas, pueden usarse para simular las emisiones de material particulado generadas por estas fuentes.

Durante el periodo de muestreo en las estaciones Zalesa, ESPA, Unimag y Almendro, se encontró que las concentraciones de PST están por encima del valor anual (media geométrica inferior a  $98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). En cuanto al límite diario ( $298 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), establecido por la normatividad, las estaciones Zalesa y ESPA exceden el valor permisible. Lo anterior indica que la ciudad de Santa Marta presenta niveles violatorios de la calidad del aire en lo referente a partículas PST.

Para las concentraciones de  $PM_{10}$ , el criterio del límite para periodos de 24 horas ( $98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) no se cumple para las estaciones Zalesa y ESPA; la primera supera la norma diaria en un 14 % de las mediciones. En el análisis de la norma referida a la media aritmética anual ( $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), se encontró que las concentraciones medidas en las estaciones ESPA, Almendro y Zalesa no cumplen con el criterio de calidad del aire fijado por la norma, solo la estación Unimag cumple con un valor de ( $49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Estos datos permiten concluir que en la ciudad de Santa Marta se están violando los valores permisibles para el parámetro  $PM_{10}$ .

Santa Marta, por ser una ciudad que posee fuentes de emisión importantes de material particulado, tales como las actividades portuarias, las canteras, el aerosol marino, los cerros, entre otros, debe poseer un número mayor de estaciones de monitoreo de la calidad del aire en el casco urbano, que fortalezcan la red actual, con el fin de llevar un registro más completo de las emisión de material particulado suspendido (PST) y de la fracción respirable ( $PM_{10}$ ).

## Referencias

- Abdul, S. (2004). Evaluación del cortocircuito de complejo de fuente industrial-el modelo: dispersión de período sobre terreno. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 54, 396-408. Pittsburgh.
- Arciniegas, C. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM<sub>10</sub>. *Revista Luna Azul*, 34, 1-19.
- Benavides, H. (2003). *Pronóstico de la concentración de material particulado por chimeneas industriales en Bogotá* (tesis de maestría inédita). Universidad Nacional de Colombia-Facultad de Ciencias. Departamento de Geociencias, Bogotá, Colombia.
- Bhanarkar, A. (2005). Assessment of Contribution of SO<sub>2</sub> and NO<sub>2</sub> from Different Sources in Jamshepur Region, India. *Atmospheric Environment*, 39, 7745-7760.
- Dias, J. y López, J. (2006). Implementation and Assessment of Hydrodynamic, Salt and Heat Transport Models: The Case of Ria de Aveiro Lagoon, Portugal. *Environmental Modelling and Software*, 21, 1-15.
- Díaz-Robles, L. et al. (2008). A Hybrid ARIMA and Artificial Neural Networks Model to Forecast Particulate Matter in Urban Areas: The case of Temuco, Chile. *Atmospheric Environment*, 42, 8331-8340.
- Environmental Protection Agency (EPA). (1995). *Users Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models. Volumen I: Instrucciones para el usuario*. North Carolina: EPA.
- García, F., Agudelo, R. y Jiménez, K. (2006). Distribución espacial y temporal de la concentración de material particulado en Santa Marta, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Salud Pública*, 24, 73-82.
- Hao, J., He, D., Wu, Y., Fu, L. y He, K. (2000). A Study of the Emission and Concentration Distribution of Vehicular Pollutants in the Urban Area of Beijing. *Atmospheric Environment*, 34, 453-465.
- Holmes, N. y Morawska, L. (2006). A Review of Dispersion Modelling and its Application to the Dispersion of Particles: An Overview of Different Dispersion Models Available. *Atmospheric Environment*, 40, 5902-5928.
- Martin, F. (2006). *Inventario de modelos utilizados para calidad del aire: quinto seminario de Calidad del Aire en España*. Santander: Ciemat.
- Ozkaynak, H., Frey, H., Brurke, J. y Pinder, R. (2009). Analysis of Coupled Model Uncertainties in Source-to-Dose Modeling of Human Exposures to Ambient Air Pollution: A PM<sub>2.5</sub> Case Study. *Atmospheric Environment*, 43, 1641-1649.

- Park, J., Rock, J., Wang, L., Seo, Y., Bhatnagar, A. y Kim, S. (2009). Performance Evaluation of Six Different Aerosol Samplers in a Particulate Matter Generation Chamber. *Atmospheric Environment*, 43, 280-289.
- Perrone, M., Turtone, A., Buccolieri, A. y Buccolieri, G. (2006). Particulate Matter Characterization at a Coastal Site in South-Eastern Italy. *Journal of Environmental Monitoring*, 8, 183-190.
- Pope, C. y Dockery, D. (2006). Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect. *Air & Waste Management Association*, 56, 709-742.
- Riediker, M. *et al.* (2004). Particulate Matter Exposure in Cars is Associated with Cardiovascular Effects in Healthy Young Men. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 169, 934-940.
- Sahu, S., Gelfand, A. y Holland, D. (2006). Spatio-Temporal Modeling of Fine Particulate Matter. *Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics*, 11 (1), 61-86.
- Venegas, L. y Mazzeo, N. (2006). Modelling of Urban Background Pollution in Buenos Aires City (Argentina). *Environmental Modelling & Software*, 21, 577-586.
- Viana, M. (2003). *Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en los sectores norte y este de la península ibérica y Canarias* (tesis de doctorado inédita). Universidad de Barcelona, Barcelona, España.

