

Effect of relative humidity in determining PM₁₀ using a DataRam 4 in coastal region of Colombia

Roberto Rojano¹, Jhonny Pérez¹, Edesnel Freyle²

¹Instituto de Estudios Ambientales y Aprovechamiento de Agua, Grupo de Investigación GISA.
²Ingeniero del Medio Ambiente.

Universidad de La Guajira. Km 5 vía a Maicao, Riohacha, Colombia. Tel 095-7286980.
aroberto12@hotmail.com, jpemon@hotmail.com.

Abstract

The particulate matter PM₁₀ has been linked to mortality and morbidity by a variety of epidemiological studies. This research measured concentrations of PM₁₀ in the urban area of Riohacha, Colombia and was evaluated the effect of relative humidity on concentrations of PM₁₀. The instrument used for the study was a nephelometer DataRam 4 (Thermo Electron Corporation). Data were collected for three months in two sites (Desalud and Bienestar) of the urban area of Riohacha. The team worked continuously recording levels every 10 minutes and stored hourly and daily averages. The team located at a height of 4 meters above the ground in open space areas without interference structures. The results of the 28 samples, showed that the average concentration of PM₁₀ was 23.64 µg/m³ to Desalud sample point and 36.86 µg/m³ to Bienestar sample point. A weak correlation was found when the relative humidity (RH) was lower than 70%: $R_{\text{tight}} = 0.1949$ and 0.3860 for sampling points, Desalud and Bienestar respectively, but no significant differences between RH and concentration of PM₁₀ ($p = 0.447$ for Desalud and $p=0.132$ for Bienestar). The correlation increased when the RH was higher than 70%. ($R_{\text{tight}}= 0.7727$ for Desalud and 0.6565 for Bienestar) there significant differences between RH and PM₁₀ for both sampling points ($p = 0.000$ for Desalud and 0.0032 for Bienestar).

Keywords: particle, sampling, nephelometer, relative humidity, concentration, PM₁₀.

Efecto de la humedad relativa en la determinación de PM₁₀ utilizando un DataRam 4, en una zona costera de Colombia

Resumen

El material particulado PM₁₀, ha sido asociando con la mortalidad y morbilidad en diferentes estudios epidemiológicos. Esta investigación analizó las concentraciones de PM₁₀ en la zona urbana del municipio de Riohacha, Colombia, y se evaluó el efecto de la humedad relativa sobre las concentraciones de PM₁₀. El instrumento utilizado para el estudio fue un nefelómetro DataRam 4 (Thermo Electron Corporation). Los datos fueron obtenidos durante tres meses en dos sitios de (Desalud y Bienestar) de la zona urbana de Riohacha. El equipo funcionó de manera continua registrando las concentraciones cada 10 minutos y almacenando promedios horarios y diarios y se ubicó a una altura de 4 metros sobre el nivel del suelo, en zonas de espacio abierto sin interferencia de estructuras. Los resultados de las 28 muestras, mostraron que el promedio de la concentración de PM₁₀ fue de 23,64 µg/m³ para el punto de muestreo Desalud y 36,86 µg/m³ para el punto de muestreo Bienestar. Una débil correlación fue encontrada cuando la humedad relativa (HR) fue menor al 70%; $R_{\text{ajustado}} = 0,1949$ y $0,3860$ para las estaciones Desalud y Bienestar, respectivamente, pero no existe diferencias significativas entre la HR y la concentración de PM₁₀ ($p = 0,447$ para Desalud y $p=0,132$ para Bienestar). La correlación se incrementó cuando la HR fue mayor al

70% ($R_{\text{ajustado}} = 0,7727$ para Desalud y 0,6565 para Bienestar) existiendo diferencias significativas entre HR y PM₁₀ para ambas estaciones de muestreo ($p = 0,000$ para Desalud y 0,0032 para el Bienestar.)

Palabras clave: partículas, muestreo, nefelómetro, humedad relativa, concentración, PM₁₀.

Introducción

La exposición de la salud humana a los contaminantes particulados ha sido investigada extensivamente y ha sido asociado con excesos en la morbilidad y mortalidad [1, 2]. La correlación entre altos niveles de material particulado y el incremento de la morbilidad y mortalidad específicamente la fracción de partículas PM₁₀ (partículas suspendidas con diámetro aerodinámico menor de 10 μm) ha sido estudiada, comprobándose que éstas pueden ser inhaladas dentro de los pulmones, causando daños en los tejidos alveolares induciendo problemas de salud [3]. A menudo estas partículas causan un forzamiento radiactivo directamente a través de la reflexión y la absorción de la radiación solar e infrarroja en la atmósfera. Algunos aerosoles pueden causar un forzamiento positivo, mientras que otros causan un forzamiento negativo [4]. Estudios epidemiológicos en ciudades de los Estados Unidos han enfatizado en la importancia de medir partículas finas, especialmente la medición de PM₁₀ y PM_{2.5} (Partículas suspendidas con diámetro aerodinámico menor de 10 y 2.5 μm , respectivamente) en vez de PST (partículas suspendidas totales), debido a que la correlación de las partículas finas con la morbilidad y mortalidad, en las áreas urbanas fue ser muy altas [5]. En las ciudades los núcleos industriales y comerciales buscan suplir las necesidades básicas de la población y al mismo tiempo pueden contribuir a la contaminación ambiental que transforman estas grandes ciudades en verdaderas trampas mortales. La zona urbana de la ciudad de Riohacha en su mayor parte se encuentra influenciado por las fuentes móviles, que utilizan procesos de combustión interna; en estos procesos de combustión se pueden liberan a la atmósfera contaminante como partículas sólidas en suspensión que pueden contener metales e hidrocarburos. Este contaminante producido por los vehículos se encuentra en función del tamaño, antigüedad y características de funcionalidad [6]. Las tres principales técnicas de medición de la contaminación por particulado en el aire son: colectores gravimétricos, instrumentos

ópticos y dispositivos electroquímicos. De estas técnicas, los instrumentos ópticos utilizan una fuente de luz para medir la capacidad de las partículas para dispersar y absorber la luz. Los dispositivos más comunes son los nefelómetros que miden la intensidad de la luz y la intensidad de la luz distante. Los nefelómetros pueden ser utilizados para medir la dispersión de partículas suspendidas en el aire y el tamaño de las partículas en suspensión [7, 8]. La correlación entre la masa de partículas y la dispersión de la luz de las mismas partículas ha sido usada como principio para medir la concentración de partículas por instrumentos conocidos como fotómetros o nefelómetros [9, 10]. En la utilización de la técnica de dispersión de la luz para determinar concentraciones de PM₁₀ hay un factor muy importante a tener en cuenta que es la humedad relativa. Autores han relacionado el efecto de la humedad relativa sobre las concentraciones de partículas especialmente en aerosoles. Las partículas finas (< 10 μm) son bastantes higroscópica y la masa de agua en la fase de condensación se incrementa con la humedad relativa [11, 12]. El objetivo de este artículo es determinar la concentración de PM₁₀, en la zona urbana de Riohacha, utilizando como colector un DataRam 4 (Monitor en tiempo real con almacenamiento de datos), modelo DR-4000 y estudiar el efecto de la humedad relativa sobre la concentración de PM₁₀.

Materiales y métodos

Selección del área de estudio

Las principales fuentes de contaminación en la ciudad de Riohacha son las fuentes móviles, las emisiones de fuentes misceláneas, principalmente vías no pavimentadas y un número relativamente pequeño de restaurantes que operan en la zona urbana. La evaluación de las fuentes y los procesos meteorológicos que afectan a los niveles de material particulado PM₁₀ en la ciudad de Riohacha no requiere un estudio exhaustivo para la selección de los puntos de muestreos, dado que en la ciudad encuentran en un entorno meteorológico muy homogéneo y las fuentes de ma-

yor aporte a la concentración de PM_{10} , son las fuentes móviles, por ser una ciudad pequeña, es fácil identificar las intercepciones de mayor tráfico vehicular. Para establecer el número representativos de sitios de muestreo, se procedió según lo establecido en el protocolo de aire del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [13]. En la Figura 1 se muestra la ubicación de los dos sitios de muestreo seleccionados para el desarrollo del estudio (A y B) y la ubicación de la estación meteorológica de IDEAM (C), usada para la información de temperatura, velocidad del viento y como punto control para la humedad registrada por los equipos. Los sitios fueron seleccionados como resultado de la realización del inventario de emisión, los cuales coincidieron con el estudio realizado por Amaya [14]. Los criterios utilizados para la ubicación de los puntos de muestreo fueron: tráfico vehicular, zonas resi-

denciales, aglomeración urbana de mayor actividad, condiciones de seguridad, disponibilidad de energía eléctrica y espacios libre de obstáculos. En la Tabla 1, se presentan en forma resumida, las características de estos dos sitios de muestreos.

Descripción del área de estudio

La investigación se realizó en la zona urbana de la ciudad de Riohacha, capital del Departamento de La Guajira ubicada en el Sureste del Departamento en el Caribe Colombiano, la ciudad de Riohacha se encuentra situada geográficamente entre las coordenadas $11^{\circ} 30' 44,37''$ Norte, $72^{\circ} 55' 26,09''$ Oeste y $11^{\circ} 33' 15,65''$ Norte, $72^{\circ} 53' 29,77''$ Oeste. Riohacha es la ciudad con más densidad de tráfico en el Departamento de La Guajira y una con las de menor trafico de

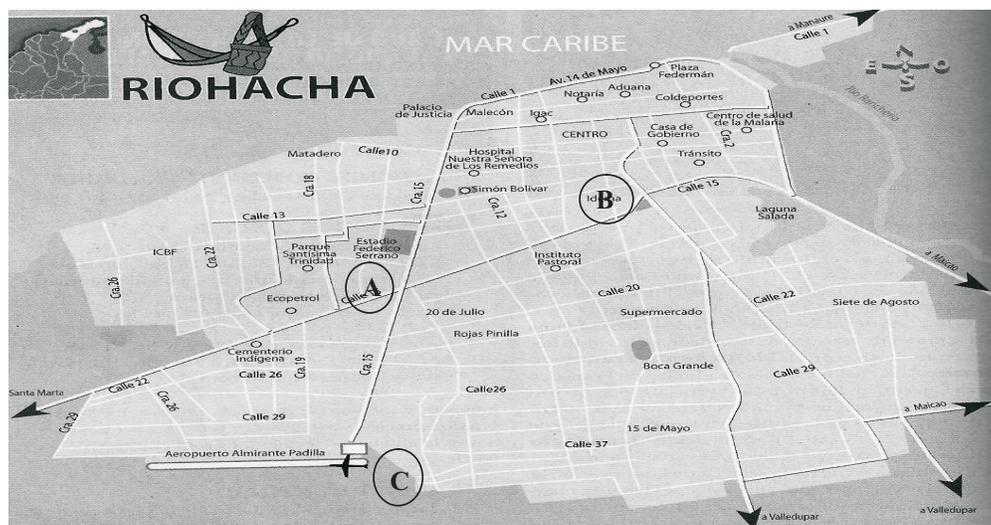


Figura 1. Localización de los sitios de muestreo en el área de estudio (A: Instituto de Bienestar Familiar, B: Secretaria de Salud (DESALUD) y C: Ubicación de la estación meteorológica del IDEAM.

Tabla 1
Características de los sitios de muestreos y de la estación meteorológica del IDEAM

| Sitio de muestreo | Coordenadas | Uso de Tierra | Topografía del Terreno | Observaciones |
|------------------------|--|------------------------|------------------------|---|
| Bienestar familiar (A) | N: $11^{\circ}32'29.7''$ O: $72^{\circ}55'14.2''$ | Residencial | Plano | Alto tráfico vehicular |
| DESALUD (B) | N: $11^{\circ}32'58.5''$ O: $72^{\circ}54'44.6''$ | Residencial /comercial | Plano | Alto tráfico vehicular – zona comercial |
| IDEAM (C) | N: $11^{\circ}31'34.40''$ O: $72^{\circ}55'33.45''$ | Privado | Plano | Aeropuerto, ciudad de Riohacha |

Colombia. Está rodeado por el Océano Atlántico de noreste a Suroeste y por las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta, en los lados restantes. La población cuenta con más de 200.000 habitantes en la ciudad y sus alrededores. El clima de La Guajira, especialmente en la ciudad Capital, es seco con temperatura promedio de 28 °C, modificadas un poco con la brisa marina y los vientos alisios del noreste que soplan durante la mayor parte del año; las lluvias son escasas y se presentan generalmente en los meses de septiembre a noviembre [15].

Muestreo y medida de niveles de PM₁₀

Se utilizó un monitor DataRam 4 (Thermo Electron Corporation). Este equipo es un monitor de doble longitud de onda de alta sensibilidad, cuya configuración de sensores de difracción de luz mide las concentraciones en tiempo real. Este modelo ha sido optimizado para la medición de la fracción de partículas finas del polvo suspendido, con un intervalo de medición de 0,1 µg/m³ a 400 µg/m³ y con intervalo de medición de humedad relativa de 0 a 100% (exactitud: 2%, sin condensación, a 25 °C). El equipo operó a 3 l/min, con una longitud de onda (λ) de 550 nm. La cantidad luz dispersada, es convertida a lecturas concentración de partículas. El equipo se calibró siguiendo el estándar de calibración recomendado por el fabricante. Se calibró gravimétricamente para un aerosol particular en condiciones de campo (condiciones reales de uso). Para realizar dicha calibración se pesó un filtro de membrana nuevo en la porta-filtro analítica, se le dio inicio a la corrida de medición para determinar el factor de corrección. Se calibro utilizando partícula fina

de 3 µm, densidad de 2,6 g/cm³ y como resultado se obtuvo un índice de refracción de 1,28, se seleccionó este valor en la pantalla del DataRam 4. Este equipo fue diseñado para medir la concentración de material particulado suspendido (líquido o sólido), así como el tamaño medio de partícula, temperatura y humedad del aire, proporcionando lectura directa y continua, así como almacenamiento electrónico de la información. En cada sitio se tomaron 28 muestras. El equipo operó de forma continua, registrando las concentraciones cada 10 minutos, almacenando promedios horarios y diarios. El equipo se ubicó a una altura de 4 metros sobre el nivel del suelo, en zonas de espacio abierto sin interferencia de estructuras.

Presentación y análisis de resultados

En la Tabla 2, se presentan los datos meteorológicos de la zona de estudio durante el tiempo de muestreo. Se observan los valores de temperatura, velocidad del viento y humedad relativa de la estación meteorológica Almirante Padilla del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la humedad relativa registrada por el dataloger del DataRam 4 en cada punto de muestreo. Los valores de humedad relativa en los dos sitios de muestreo fueron similares y con promedios y coeficientes de variación menor a los registrados en el Aeropuerto Almirante Padilla.

El contenido de agua en el aerosol atmosférico es determinado por la composición de las partículas y la humedad relativa, la cantidad de

Tabla 2

Descripción de los parámetros meteorológicos en el periodo de muestreo marzo-mayo de 2009

| Parámetro | n | Media | Máximo | Mínimo | s | C.V |
|------------------|----|-------|--------|--------|------|-------|
| Temperatura, °C* | 28 | 26,70 | 35,00 | 18,80 | 0,56 | 2,10 |
| Viento, m/s* | 28 | 10,15 | 13,60 | 3,30 | 0,63 | 6,22 |
| HRC, %* | 28 | 72,18 | 83,00 | 56,00 | 7,24 | 10,03 |
| HRB, % ** | 28 | 71,32 | 82,00 | 56,00 | 5,89 | 8,27 |
| HRA, % ** | 28 | 71,89 | 82,00 | 64,00 | 5,50 | 7,70 |

n= número de datos, σ = desviación estándar, C.V= coeficiente de variación determinado con el valor promedio. * Parámetros registrados en la estación meteorológica del IDEAM (C). **Humedad relativa registrada por el dataloger del DataRam 4 Bienestar (A) y Dasalud (B), respectivamente.

agua en las partículas se incrementa rápidamente cuando la humedad relativa está por encima de aproximadamente el 70% [10, 12] y como se puede observar en la Tabla 2, el promedio de la humedad relativa registrada en los dos sitios fueron superiores al 70%.

La Figura 2, muestra el resultado de las concentraciones de PM_{10} obtenidas con el DataRam 4, para los dos puntos de muestreo durante el periodo estudiado (marzo 29 a mayo 22 de 2009). Los resultados de las concentraciones del Bienestar son superiores a los de Desalud en un 55,92% (tomando los promedios), lo que se justifica por el alto tráfico vehicular que se presenta en el sector denominado “cuatro vías” aledaño al Bienestar Familiar.

Los promedios de las concentraciones de PM_{10} , fueron de de $23,64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $36,87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con una desviación estándar de $3,93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $3,48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los puntos de muestreo de Desalud y Bienestar respectivamente. Similares resultados fueron reportados en los mismos puntos de muestreo el periodo comprendido entre el 29 de marzo al 20 de abril de 2007 (Desalud, $25,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y bienestar, $39,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) usando como colector un Hi-Vol PM_{10} [14].

El estado Colombiano a través de la resolución 0601 de 2006 [16] vigente en el periodo de muestreo establecía los niveles máximos permisibles en condiciones de referencia para contaminantes atmosféricos, que para el PM_{10} es de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$, en un periodo de muestreo de 24 horas. Sin embargo, el 24 de marzo de 2010 esta resolu-

ción fue derogada por la resolución 0610 de 2010 la cual redujo el estándar de PM_{10} en 24 horas a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [17]; Las concentraciones registradas en ambos puntos de muestreo no excedieron el valor máximo permisible de la normativa vigente colombiana; mucho menos el nivel de la National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) de los Estados Unidos de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [18]. Los máximos valores registrados fueron $30,30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 16 de mayo de 2009 y $45,00 \mu\text{g}/\text{m}^3$ el 20 de mayo de 2009 para Desalud y Bienestar, respectivamente.

La regresión lineal puede ser utilizada para evaluar la correlación entre los resultados de las concentraciones y el comportamiento de la humedad relativa. Este indicador se puede utilizar como herramienta de análisis del comportamiento de las concentraciones con respecto a la humedad relativa [19]. La Figura 3, muestra el análisis de regresión lineal entre el resultado de las concentraciones y el comportamiento de la humedad relativa menores del 70% medidas por el datalogger de cada equipo. Los resultados de regresión muestran en el punto de muestreo Desalud utilizando el DataRam 4 (intercepto = 3,376, pendiente = 0,3254, $R^2 = 0,0657$, $n = 11$) y para el punto de muestreo Bienestar (intercepto = 70,215, pendiente = -0,525, $R^2 = 0,2329$, $n = 11$), respectivamente. Los valores de $R=0,2563$ y $0,4825$ indican una débil correlación entre PM_{10} y humedad relativa, lo que se puede corroborar con $R_{\text{ajustado}} = 0,1949$ y $0,3860$ y valor de $p = 0,447$ y $0,132$ para los puntos de Desalud y Bienestar, respectivamente; esto indica que no existe diferencia significativa entre estas variables o

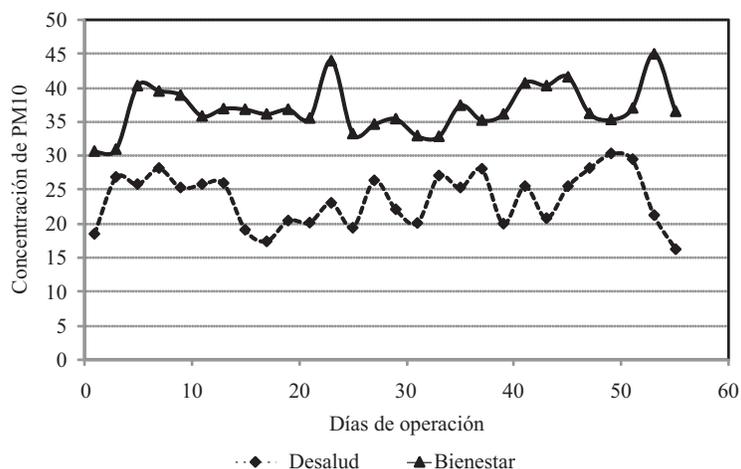


Figura 2. Concentración diaria de PM_{10} , medido con el DataRam 4.

en otras palabras cuando la humedad relativa es menor a 70%, no interfiere en la lectura o valor del PM₁₀ medido con el DataRam 4. En el muestreo fotométrico utilizando el DataRam 4, la relación entre la dispersión de la luz por la partículas y la concentración de las partículas no es afectada por la humedad relativa menor del 70% [9,20].

Al analizar el resultado de regresión lineal entre las concentraciones de PM₁₀ y la humedad relativa mayores del 70% (Figura 4) se encontró para Desalud (intercepto = -41,9; pendiente = 0,86; R² = 0,6224; n = 17) y para el Bienestar (intercepto = -12,16; pendiente = 0,65; R² = 0,4668; n = 17). Los valores de R = 0,7889 y R = 0,6832 indican una fuerte correlación que se corrobora con R_{ajustado} = 0,7727 y R_{ajustado} = 0,6525 para los puntos de Desalud y Bienestar, respectivamente; lo que generó diferencia significativa entre la HR

y PM₁₀ (p = 0,000 y p = 0,003 para Desalud y Bienestar, respectivamente). En otras palabras, cuando la humedad relativa es mayor a 70% interfiere en la lectura o valor del PM₁₀ medido con el DataRam 4. Estos resultados se pueden explicar debido a que los nitrato solubles, sulfatos, amonio, sodio, iones inorgánicos y algunos materiales orgánicos, componentes de los aerosoles absorben vapor de agua desde la atmosfera, especialmente cuando la humedad relativa excede a 70%; parte de esta humedad es retenida en el muestreo introduciendo un error en la lectura [21]. De igual manera Fierz-Schmidhauser [22], estableció que la humedad relativa (HR) influye en el contenido de agua de las partículas de aerosol y por lo tanto tiene un impacto importante en la capacidad de las partículas para dispersar la luz visible.

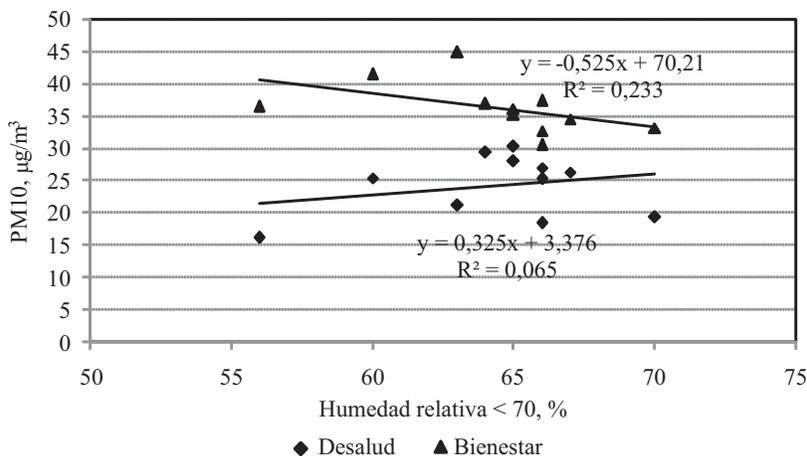


Figura 3. Correlación entre las concentraciones de PM₁₀ y la humedad relativa menor del 70%.

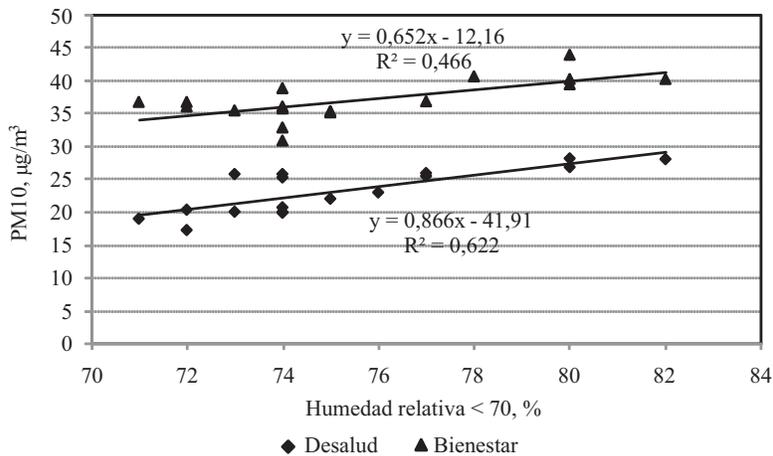


Figura 4. Correlación entre las concentraciones de PM₁₀ y la humedad relativa mayor del 70%.

Las concentraciones de PM_{10} , principalmente en zonas costeras, sufren un aumento cuando el muestreo se hace con un nefelómetro, esto debido principalmente al aumento en el tamaño medio de partícula asociado al crecimiento de la condensación de los componentes higroscópicos en las partículas. Este efecto fue estudiado [23] modelando el diámetro del material particulado y el crecimiento de la dispersión de la luz, para tamaños de partículas secas y húmedas, concluyendo que las propiedades físicas y químicas de los aerosoles reducen la visibilidad en aire cuando aumenta la humedad relativa. Este modelo fue válido para todos los intervalos de humedad relativa estudiados, por lo que se hizo necesario desarrollar un modelo empírico de datos reales, basados en la relación de la masa de partículas húmedas y secas y la humedad relativa [24].

Se puede analizar que los resultados anteriores muestran que el DataRam 4 (Monitor en tiempo real con almacenamiento de datos), modelo DR-4000, en las condiciones meteorológicas de la ciudad de Riohacha, proporciona resultados parecidos a los obtenidos por algunos autores en estudios similares [9, 20, 25], donde se obtienen correlación fuerte cuando se analizan los datos con humedades relativas mayores a 70% y esta correlación se debilita cuando se relacionan datos de concentraciones de PM_{10} y la humedad relativa con valores menores al 70%.

Conclusiones

En los dos puntos de muestreo los resultados de las concentraciones de PM_{10} , no violan el estándar diario de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para un periodo de muestreo de 24 horas establecido en la norma Colombiana tampoco el National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) de los estados unidos de $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los resultados muestran que las concentraciones aumentan con las influencias de fuentes móviles, como se pudo apreciar en el punto de muestreo ubicado en el Bienestar, zona de alto tráfico, donde los resultados de las concentraciones fueron un 10% mayor que las obtenidas en Desalud. La técnica fotométrica para medir material particulado menor de 10 micras, (PM_{10}) utilizando el DataRam 4, es una técnica viable, sin embargo, los resultados sugieren un cuidado especial en la metodología debido a la in-

fluencia de variables meteorológicas, especialmente la humedad relativa >70% que origina un aumento en el nivel de concentración y por tanto resultados no confiables. De toda manera, los nefelómetros pueden medir las concentraciones del material particulado en la atmósfera en tiempo real y aminorar costo con relación a otras técnicas. Los resultados de las concentraciones de PM_{10} , resultaron similares en comparación con estudios realizados en la misma ciudad utilizando la técnica gravimétrica de alto volumen, catalogado de referencia por la agencia de protección del ambiente de EUA (EPA) y el estado colombiano. El Análisis de Correlación mostró que no existe diferencia significativa entre las concentraciones de PM_{10} y la humedad relativa para humedades relativas menores del 70%. Se puede apreciar un aumento del coeficiente de correlación cuando la humedad relativa es mayor al 70%, indicando fuerte influencia de la humedad relativa sobre las concentraciones en estas condiciones meteorológicas. Se puede concluir que el método nefelométrico, utilizando el DataRam 4, es una técnica viable para las condiciones ambientales y meteorológicas de la ciudad de Riohacha.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Corporación Autónoma Regional de la Guajira, Corpoguajira y a la Universidad de La Guajira por el financiamiento de este proyecto, al Instituto de Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia, por suministrar los datos meteorológicos.

Referencias bibliográficas

1. Brunekreef, B., Holgate, S.: "Air pollution and health". *The Lancet*, Vol. 360, (2002) 1233-1342.
2. Pope, C., Dockery, D.: "Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect". *Journal of the Air and Waste Management Association*, Vol. 56, (2006) 1368-1380.
3. Vallius, J.; Ruskannen, J.; Mirme, A.; Pekkanen, J.: Concentrations and Estimated Soot Content of PM_1 , $PM_{2.5}$, and PM_{10} in a Subarctic Urban Atmosphere. *Environmental Science Technology*, Vol. 34, (2000) 1919-1925.

4. Senlin L., Qixia L., Zheng J., Minghong W., Zhen L., Longyi S., Fushun W.: "Mineralogy of Inhalable Particulate Matter (PM₁₀), in the Atmosphere of Beijing, China". *Journal Water Air Soil Pollutant*, Vol. 186, (2007) 129-137.
5. Kainka E., Kramert G. and Dudzeviciusij J.: "Characterization of particulate matter PM₁₀ and PM_{2.5} in northrhine westphalia, saxonia and Lithuania: first results". *British Occupational Hygiene Society*, Vol. 41. Supplement 1, (1997) 54-59.
6. Rojano, R., Soto, D, Mendoza, Y, Alvarado, A, y Gámez, E. "Determinación de la concentración de partículas suspendidas totales (PST), en la zona urbana de la ciudad de Riohacha, la guajira colombiana". Universidad de La Guajira. Centro de Investigación. Facultad de Ingeniería. Riohacha, Colombia, 120 p. 2007.
7. Trent A., Ann M., Fisher R., Thistle H., Babbitt R.: "Evaluation of optical instruments for real-time continuous monitoring of smoke particles". Department of Agriculture Forest Service, Technology and Development Program. Missoula, MT: U.S. (2000) 38 p.
8. John G. Watson, Judith C. Chow, Hans Moosmüller, Mark Green, Neil Frank, Marc Pitchford U.S. "Guidance for using continuous monitors in PM_{2.5} monitoring networks". Environmental Protection Agency. Office of Air Quality Planning and Standards. 180 p. 1998.
9. Sioutas C., Seongheon K., Chang M., Terrell L., Gong H.: "Field evaluation of a modified DataRam MIE scattering monitor for real-time PM_{2.5} mass concentration measurements". *Atmospheric Environment*. Vol. 34, (2000) 4829-4838.
10. Jimenez J., Chang-Fu W., Claiborna C., Tim Gould, Simpson C., Larson T., Sally Liuc J.: "Agricultural burning smoke in eastern Washington: part I: Atmospheric characterization". *Atmospheric Environment*. Vol. 40, (2006) 639-650.
11. Chakrabartia B., Finea Philip M., Delfinob Ralph, Sioutasa Constantinos.: "Performance evaluation of the active-flow personal DataRam PM_{2.5} mass monitor (Thermo Anderson pDR-1200) designed for continuous personal exposure measurements". *Atmospheric Environment*. Vol. 38, (2004) 3329-3340.
12. McMurry Peter H.: "A review of atmospheric aerosol measurements". *Atmospheric Environment*. Vol. 34, (2000) 1959-1999.
13. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. "Protocolo para la vigilancia y seguimiento del modulo aire del sistema de información ambiental". IDEAM. Colombia, Bogotá. D. C. 2005.
14. Amaya M.: "Estudio de emisiones atmosféricas para el municipio Riohacha en los contaminantes partículas suspendidas totales (PST) y Partículas menores de 10 micras PM₁₀". K2 Ingeniería. Riohacha, Colombia. (2008)11-24.
15. Cabeza D. "Climatología de los principales puertos del Caribe Colombiano". Centro De Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. CIOH, Boletín Científico. Riohacha, Colombia 4-10 2009.
16. República de Colombia. Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Resolución 0601. "Por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia". Diario Oficial No. 46.232, 2006.
17. República de Colombia. Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Resolución 0610. "Por la cual se modifica la Resolución 601 del 4 de abril de 2006. La Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia". Diario Oficial No. 47.672, 2010.
18. Environmental Protection Agency. (2010). Office of Air Quality Planning and Standards. National Ambient Air Quality Standards (NAAQS). [on-Line]: <http://www.epa.gov/air/criteria.html>. Febrero 4 de 2009.
19. King, D., Kirchoff, W. "Evaluation of interlaboratory comparison data on linear regression analysis. In *Methods and Standards for Environmental Measurement*". Editor. NBS Publication 464 Gaithersburg, MD. 1977.
20. Watson J., Chow J., Moosmüller H., Mark G., Neil F., Marc P. "Guidance for using continu-

- ous monitors in pm_{2.5} monitoring networks". Office of Air Quality Planning and Standards. EPA. U.S.. Research Triangle Park, NC 27711. 1998.
21. Tang, I., Munkelwitz, H. "Deliquescence properties and particle size change of hygroscopic aerosols. In Generation of Aerosols and Facilities for Exposure Experiments", Willeke, K., editor. Ann Arbor Science Publishers, Inc., Ann Arbor. 1993.
 22. Fierz-Schmidhauser R., Zieger P., Wehrle G., Jefferson A.; Ogren, J., Baltensperger U., Weingartner E.: "Measurement of relative humidity dependent light scattering of aerosols". Atmospheric Measurement Techniques, Vol. 3, Issue 1, (2010) 39-50.
 23. Sloane C.: "Optical properties of aerosols of mixed composition". Atmospheric Environment. Vol. 18, (1984) 871-878.
 24. Sloane C., Wolff G.: "Prediction of ambient lightscattering using a physical model responsive to relative humidity. Validation with measurements from Detroit". Atmospheric Environment. Vol. 19, (1985) 669-680.
 25. Shena S., Jaquesb P., Zhuh Y., Gellera M., Sioutas C.: "Evaluation of the SMPS-APS system as a continuous monitor for measuring PM_{2.5}, PM₁₀ and coarse (PM_{2.5_10}) concentrations". Atmospheric Environment. Vol. 30, (2002) 1959-1999.

Recibido el 15 de Enero de 2011

En forma revisada el 16 de Abril de 2012