

## Empleo de datos satelitales para estimación de contaminación atmosférica por material particulado en La Habana.

### Use of satellite data for estimation of air pollution by particulate matter in Havana.



<https://eqrcode.co/a/X5Adtg>

 Veronica Gutiérrez Quintero<sup>1\*</sup>, Elieza Meneses Ruiz<sup>1</sup>, Alina Roig Rassi<sup>1</sup>, Marco Andrés Guevara Luna<sup>2</sup>,

Luis Carlos Belalcazar<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Colombia

**RESUMEN:** Las mediciones de material particulado son importantes en calidad del aire, salud pública, estudios epidemiológicos y toma de decisiones para mediciones a corto y largo plazo. En Cuba no existen redes de monitoreo de calidad del aire. Solo en algunos puntos están instaladas estaciones de calidad de aire que miden la concentración de PM (Material Particulado). Las mediciones satelitales sirven como un enfoque alternativo para estudiar la calidad del aire. El objetivo del estudio es evaluar el empleo de datos satelitales para la estimación de contaminación atmosférica por material particulado en La Habana. La profundidad óptica del aerosol (AOD) recuperada por el sensor MODIS de los satélites TERRA y AQUA, y PM<sub>2.5</sub> en la superficie del producto satelital MERRA-2 se usaron para comparar con las mediciones de superficie de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> durante una campaña realizada en 2012 en tres lugares de La Habana. Se determinó la correlación lineal entre datos de satélite y de superficie, así como tres estadígrafos para evaluar correspondencia de los valores entre ambas muestras. La relación de datos del satélite con mediciones in situ concluye que: Los datos de concentración de PM<sub>2.5</sub> en superficie del producto satelital MERRA-2 no son óptimos para la estimación de contaminación atmosférica por PM<sub>2.5</sub>, ya que se comporta de manera opuesta, la concentración de PM<sub>10</sub> puede estimarse tanto por MODIS-TERRA como por AQUA, aunque los resultados de MODIS-AQUA son más precisos, la correlación de PM<sub>10</sub> con MODIS-AQUA ( $r_p = 0.60$ ) dio un valor más alto que TERRA ( $r_p = 0.53$ ) y para la estimación de PM<sub>2.5</sub>, la información MODIS-TERRA puede usarse ya que la correlación calculada es  $r_p = 0.42$ .

**Palabras clave:** PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, mediciones in situ, datos satelitales, MODIS, TERRA, AQUA, MERRA2.

**ABSTRACT:** Measurements of a particulate material are important in air quality, public health, epidemiological studies and decision making for short, and long, term measurements. In Cuba, there are no air quality monitoring networks. Only at some points are there air quality stations installed that measure the concentration of PM (Particulate Matter). Satellite measurements serve as an alternative approach to study air quality. The objective of this study is to evaluate the use of satellite data for the measurement of air pollution by particulate matter over Havana. Aerosol optical depth (AOD) recovered by the MODIS sensor from the TERRA and AQUA satellites, and PM<sub>2.5</sub> at the surface of the MERRA-2 satellite product were used to compare with surface measurements of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> during a campaign carried out in 2012 at three places in Havana. The linear correlation between the satellite and surface data was determined, as well as the three statistics to evaluate the correspondence of the values between both samples. The relation of the satellite data with the measurements in situ concludes that: The data of the concentration of PM<sub>2.5</sub> in the surface of the MERRA-2 satellite product are not optimal for the estimation of atmospheric contamination by PM<sub>2.5</sub>, as it behave in an opposite way, the PM<sub>10</sub> concentration can be estimated by both MODIS-TERRA and AQUA, although MODIS-AQUA results are more accurate, the correlation of PM<sub>10</sub> with MODIS-AQUA ( $r_p=0.60$ ) gave a higher value than TERRA ( $r_p=0.53$ ) and for the estimation of PM<sub>2.5</sub>, MODIS-TERRA information can be used as the calculated correlation is  $r_p=0.42$ .

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, measurements in situ, satellite data, MODIS, TERRA, AQUA, MERRA2.

\*Autor para correspondencia: [veronica@cubaenergia.cu](mailto:veronica@cubaenergia.cu)

Recibido: 17/11/2020

Aceptado: 17/12/2020

## INTRODUCCIÓN

Las partículas o material particulado, pueden llegar a ser un elemento importante como factor contaminante en la atmósfera de una ciudad, una zona o sitio y pueden estar depositadas sobre el suelo, aunque generalmente flotan en el aire. Las mediciones son imprescindibles para evaluar los niveles de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> que caracterizan la calidad del aire de una zona, aunque para que estas sean eficientes, se debe contar con una red de estaciones de monitoreo de calidad del aire que cubran el territorio nacional con la densidad establecida. Sin embargo, se conoce de antemano que las estaciones de monitoreo de calidad del aire son costosas, pues su inversión está en el orden de 200 MUSD para medir los contaminantes antes mencionados, a lo que se le añaden los gastos anuales en operación y mantenimiento.

La modelación es otra de las vías para evaluar la contaminación atmosférica. El uso de modelos tiene particular importancia en Cuba debido a que la capacidad de las estaciones de monitoreo disponibles es extremadamente limitada. Actualmente en el país se dispone de la NC 1059:2014 (Oficina Nacional de Normalización, 2014), que establece un enfoque por niveles para realizar modelaciones de la contaminación atmosférica. Esta norma propone en su nivel más refinado el uso del sistema de modelos AERMOD, de uso reglamentado por muchos países y de alcance menor a 50 km (EPA, 2005). También se han implementado con resultados consistentes (Turtós, *et al.*, 2012), modelos regionales de corto alcance, entre decenas de metros y 300 km, como el CALPUFF (Scire, *et al.*, 2000), que incluyen una química sencilla, y utiliza una rejilla meteorológica tridimensional que es necesaria para lograr alta precisión en casos de condiciones meteorológicas complejas. A pesar de que la modelación constituye una herramienta menos costosa que las mediciones. Son necesario datos de las fuentes contaminantes y de la meteorología local, no siempre disponible.

Los datos e imágenes satelitales, aunque no presentan la misma precisión que una medición real, pueden proveer de información necesaria que ayude al diagnóstico de la contaminación atmosférica pues aporta una visión global de la zona de estudio, indicando inclusive las fuentes de contaminación y donde se deben enfocar aquellas medidas de prevención y control. El empleo de datos e imágenes satelitales se considera una de las opciones menos costosas y la información que estos brindan complementa la falta de datos causado por la falta de infraestructura de una red de monitoreo, además el uso de datos satelitales es aceptable para estimar la concentración de partículas por sus características físicas ya que pueden ser detectadas a partir del espectro electromagnético. A pesar de su limitación temporal, las imágenes satelitales aportan con una visión única sobre la calidad del aire, comple-

mentando los métodos convencionales (Wald & Baileynaud, 1999).

El uso de la profundidad óptica de aerosol (AOD) es una alternativa viable y barata para estimar los niveles de este contaminante en la región. Espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) a bordo de la órbita de los satélites Terra y Aqua de la NASA han permitido la recuperación de datos AOD a nivel mundial. Los algoritmos de recuperación han evolucionado para que puedan procesar la luminosidad medida por el instrumento. MODIS se ha convertido en una importante herramienta en la predicción de las estimaciones de concentración de partículas a nivel del suelo (Duncan, *et al.*, 2014) (Saunders, *et al.*, 2014) (Guevara-Luna, *et al.*, 2018).

El objetivo principal de este estudio es evaluar los datos satelitales para estimar las concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en La Habana en el período del 1ro de enero del 2012 hasta el 31 de diciembre del 2012. Usamos AOD recuperado de la NASA MODIS-TERRA y MODIS-AQUA, además de datos de concentración en superficie de PM<sub>2.5</sub> del producto satelital MERRA-2; en conjunto con mediciones de superficie en tres puntos característicos de La Habana. Se pretende calcular la correlación entre el AOD y el promedio mensual de las concentraciones medidas en superficie en los tres puntos seleccionados de la ciudad y con la media mensual calculada entre los tres puntos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Zona de estudio

En el período de enero a diciembre del 2012 se realizó una campaña de monitoreo sistemático de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> con una frecuencia de 24 horas por el Centro de Gestión de Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGIA), el Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología (INHEM) y la Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría (CUJAE), como parte de un proyecto internacional financiado por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) (Molina, *et al.*, 2017). En la figura 1 se muestra un mapa con la localización de las estaciones de medición CUJAE, CUBAENERGIA e INHEM.

Los equipos de mediciones fueron instalados en tres puntos diferentes de La Habana:

1. CUBAENERGIA: Ubicada en el municipio Playa, al noroeste de la ciudad, en una zona eminentemente residencial, donde radican algunas instituciones estatales no contaminantes, con escaso flujo vehicular local.
2. CUJAE: Ubicada en la Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE), municipio Rancho Boyeros, en la periferia, al suroeste del centro de la ciudad, con bajo flujo vehicular y escaso impacto de industrias locales.

3. INHEM: Ubicada en el municipio de Centro Habana, al norte y centro de la ciudad, con exposición principalmente a las emisiones del transporte automotor e impacto indirecto de algunas industrias.



Figura 1. Localización de las estaciones de medición CUJAE, CUBAENERGIA e INHEM

### Mediciones reales

Se organizaron, analizaron, promediaron y graficaron los datos diarios de concentración de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> en la unidad de medida de  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , obtenidos en los tres puntos de muestreo durante la campaña del 2012.

Estos datos se promediaron de distintas maneras para después ser comparados con los datos del satélite:

- Promedio diario de los valores obtenidos entre las tres estaciones de muestreo.
- Promedio mensual para los valores obtenidos en cada estación de muestreo.
- Promedio mensual de los valores obtenidos entre las tres estaciones de muestreo.

En la campaña fueron utilizados dos tipos de muestreadores de bajo volumen con cabezales de cortes independientes para el muestreo de las partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>: el muestreador secuencial INDERENDA modelo LVS 3.1 y el muestreador TCR TECORA ECHO PM. Ambos muestreadores tienen un flujo nominal de 2.3 m<sup>3</sup>/h (38 litros/min) y cumplen con los procedimientos de muestreo regulados por las normas europeas UNE EN 12341:1999 y UNE EN 14907:2006, para el monitoreo de partículas PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> respectivamente (Molina, 2017).

En el sitio del INHEM fue utilizado el muestreador INDERENDA (PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub>), colocado cada uno en paralelo a una altura de 5 m del suelo. En la estación de la CUJAE, los muestreadores TECORA fueron colocados en el techo de uno de los edificios de 4 pisos de la entidad a una altura de 18 m del suelo. Y en la estación de CUBAENERGIA, los equipos fueron colocados en el techo de la Institución, en un edificio de 3 pisos a una altura de 10 m sobre el suelo (Molina, 2017).

### Datos Satelitales

Se descargaron datos AOD de la interfaz en línea Giovanni (Giovanni, 2019) y de concentración de PM<sub>2.5</sub> en superficie en  $\text{kg}/\text{m}^3$  del MERRA-2. La figura 2 muestra los gráficos de los datos satelitales empleados en el trabajo.

### Regresión Lineal

Para poder determinar la correlación entre AOD - MODIS y mediciones in situ de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> se realizó una regresión lineal entre ambos datos y se obtuvieron los gráficos con las dependencias lineales entre ellos. Se obtuvo como resultado la ecuación de la recta que facilitó determinar valores de concentración de PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> a partir de datos equivalentes de AOD. Se empleó este método, por la naturaleza de los datos y sobre la base de que su correlación debe ser positiva.

### Estadígrafos empleados

Fueron empleados para realizar la evaluación y verificación de los resultados obtenidos los siguientes estadígrafos:

#### Correlación de Pearson

La correlación de Pearson evalúa la relación lineal entre dos variables continuas. Una relación es lineal cuando un cambio en una variable se asocia con un cambio proporcional en la otra variable.

$$rp = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Si  $rp = 1$  la correlación lineal es positiva perfecta.

Si  $rp = -1$  la correlación lineal es negativa perfecta.

#### Error Absoluto

El error absoluto (AE) es una medida de cuanto se alejan los valores simulados de los observados (en este caso las mediciones reales con los datos satelitales):

$$AE = |y_i - x_i| \quad (2)$$

Entre más cercanos se encuentren los valores de AE a cero, más precisa es la simulación.

#### Índice de Dispersión (SI)

El índice de dispersión expresa cuan dispersos están los valores simulados de los reales (en este caso sería lo datos satelitales con las mediciones reales):

$$SI = \frac{RSE}{x_i^2} \quad (3)$$

El SI presenta valores dentro del intervalo [0,1] y entre más cercanos se encuentren a 0, más precisa es la simulación.

RSE, es la raíz del error cuadrático definida por la siguiente ecuación:

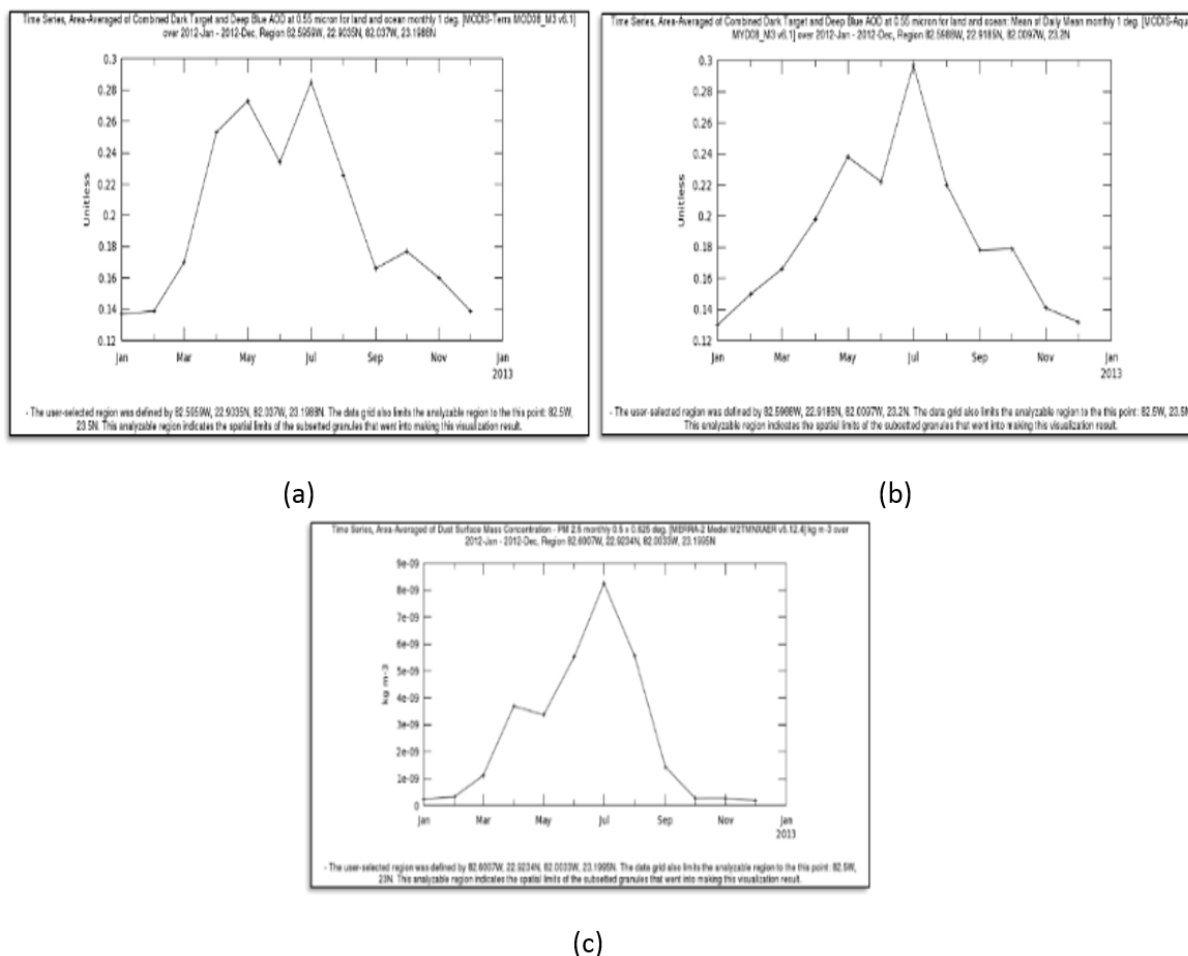
$$RSE = \sqrt{(y_i - x_i)^2} \quad (4)$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis de las mediciones reales

La [tabla 1](#) y la [figura 3](#) muestran descripciones de las concentraciones de PM10 y PM2.5 en las tres zonas de monitoreo.

Las mayores concentraciones, tanto de PM10 como de PM2.5 se registraron en la estación ubicada en el INHEM, en una zona próxima al centro de la ciudad, con predominio de actividades comerciales en la que predominó el transporte automotor como principal tipo de fuente emisora de contaminantes del aire, estos resultados son consistentes con el hecho reconocido de que los motores de los vehículos de transporte constituyen los principales emisores de contaminantes atmosféricos en zonas urbanas y en especial de partículas finas en la gran mayoría de los centros urbanos del mundo. Unido al transporte vehicular está el impacto indirecto de fuentes industriales como la refinería Níco López y la CTE Otto Parellada (Tallapiedra).



**Figura 2.** (a) Media mensual de AOD para 0.55 μm para la tierra y el océano; MODIS - TERRA, (b) Media mensual de AOD para 0.55 μm para la tierra y el océano; MODIS - AQUA, (c) Concentración de masa en superficie de PM2.5 (kg/m<sup>3</sup>) mensual MERRA-2

**Tabla 1.** Algunos parámetros estadísticos de las concentraciones diarias (μg/m<sup>3</sup>) de PM10 y PM2.5. Estaciones de monitoreo INHEM, CUBAENERGIA y CUJAE. La Habana; enero - diciembre 2012.

| Estaciones de monitoreo   | Fraciones de partículas | Mínimo μg/m <sup>3</sup> | Máximo μg/m <sup>3</sup> | Media μg/m <sup>3</sup> |
|---------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|
| INHEM (Central)           | PM10                    | 15.75                    | 89.82                    | 37.38                   |
|                           | PM2.5                   | 6.08                     | 43.60                    | 20.14                   |
| CUBAENERGIA (Residencial) | PM10                    | 2.15                     | 77.65                    | 24.37                   |
|                           | PM2.5                   | 1.05                     | 33.33                    | 12.21                   |
| CUJAE (Periférica)        | PM10                    | 7.28                     | 68.17                    | 24.92                   |
|                           | PM2.5                   | 3.88                     | 41.25                    | 12.92                   |

## Resultados para PM10

### Resultados de PM10 y AOD - TERRA

A partir de los datos AOD se obtuvieron los gráficos de regresión, que permitieron establecer la relación entre datos AOD - TERRA, los cuales se muestran en la figura 4.

La tabla 2 nos brinda las ecuaciones de regresión obtenidas para las distintas dependencias.

Conocidos los valores equivalentes a PM10 de AOD - TERRA, se obtuvieron los gráficos de comparación que se muestran en la figura 5. En esta se observa como los valores estimados por el sensor del satélite TERRA ofrece mejores resultados para el caso de CUBAENERGIA, siguiendo el mismo comportamiento que los valores reales a lo largo de todo el periodo de estudio, con una sobreestimación de los mismos en los primeros 6 meses del año mientras que el resto del año los valores reales sobrestimaron a las mediciones satelitales.

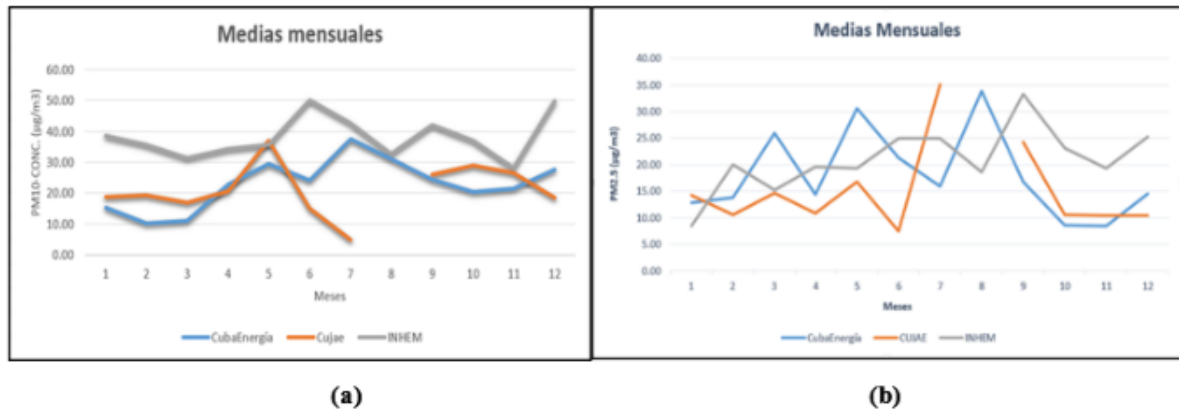


Figura 3. (a) Media Mensual de PM10 CUBAENERGIA - CUJAE - INHEM, (b) Media Mensual de PM2.5 CUBAENERGIA - CUJAE - INHEM

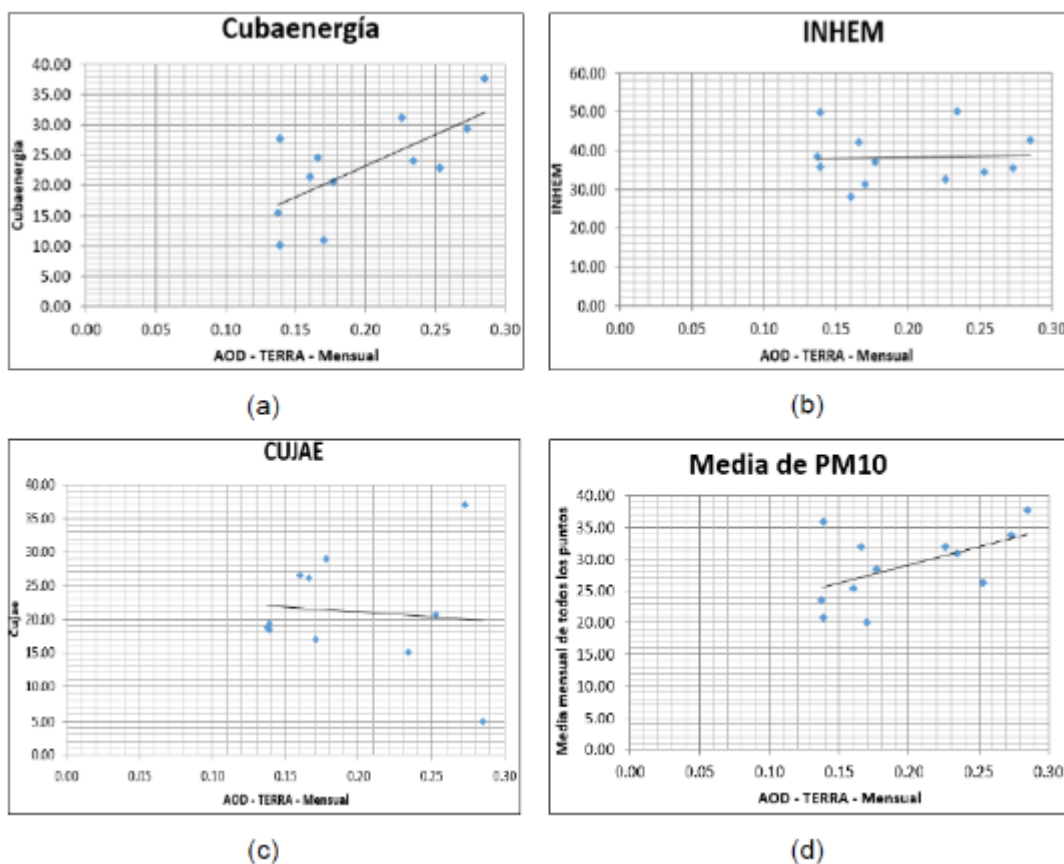
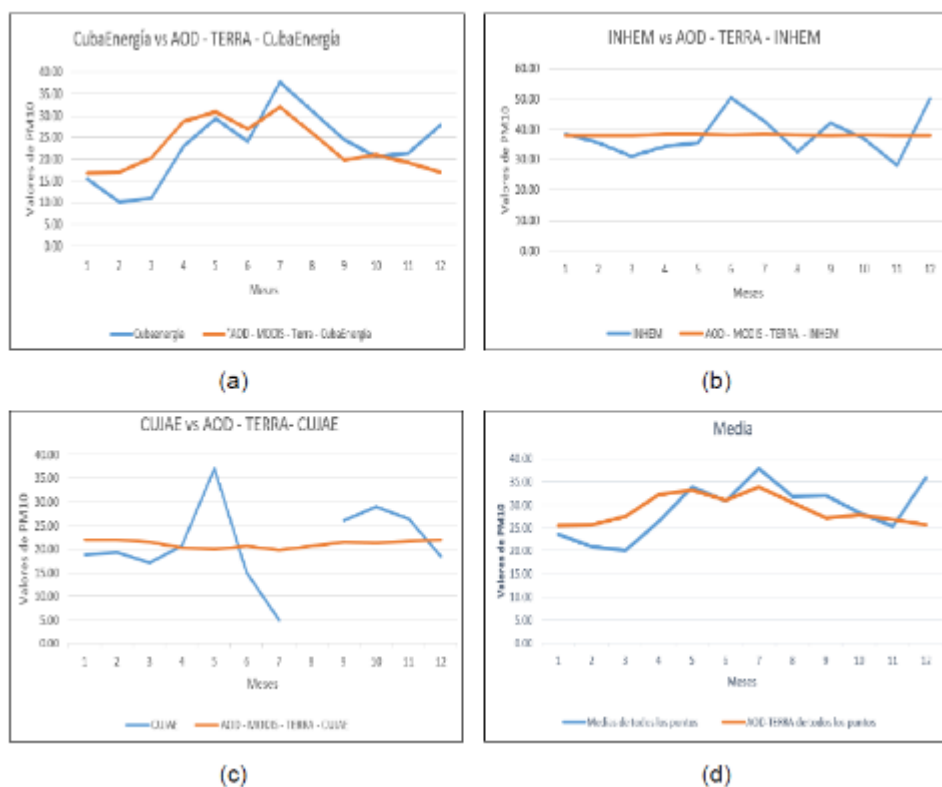


Figura 4. Regresión lineal para el PM10 a partir del AOD - TERRA: a) CUBAENERGIA b) INHEM c) CUJAE d) Promedio de los tres lugares

**Tabla 2.** Ecuaciones de regresión para PM10 y AOD - TERRA

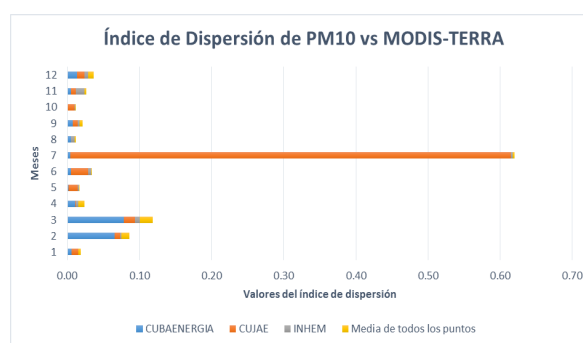
| Lugar       | Ecuación de regresión |
|-------------|-----------------------|
| CUJAE       | $y = -14.12x + 23.86$ |
| INHEM       | $y = 4.94x + 37.19$   |
| CUBAENERGIA | $y = 102.79x + 2.76$  |
| Media       | $y = 56.38x + 17.79$  |



**Figura 5.** Comparación de PM10 entre datos reales en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y datos estimados por el satélite a partir del TERRA: a) CUBAENERGIA, b) INHEM, c) CUJAE, d) Promedio de los tres lugares

Las diferencias más significativas en CUBAENERGIA entre los valores de PM10 y los datos AOD - TERRA fueron en febrero, marzo, abril y diciembre en un rango de 6 a  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La figura 6 brinda información de los índices de dispersión y se puede afirmar en las tres estaciones de mediciones y en la data de los valores medios entre todos los puntos, hubo poca dispersión entre los valores medidos y los valores estimados por datos satelitales, exceptuando en el mes de julio a la CUJAE que fue la que mayor dispersión obtuvo con un valor de 0.60. Esto pudo haber estado influenciado por condiciones locales de la zona de estudio. Esto permite evaluar como positivo el empleo de los datos satelitales para la estimación de la concentración de PM10 en zonas de la Habana.

La comparación con la media mensual de todos los puntos promediados nos brindó como información esencial que la variación del material particulado se comportó de manera similar entre los datos del satélite y las mediciones in situ. Pues entre ambos valores no existieron grandes índices de errores siendo los más significativos en los meses de febrero, marzo, abril y diciembre.



**Figura 6.** Gráfica de valores del índice de dispersión entre PM10 y AOD - TERRA

Para el caso de CUJAE e INHEM existieron muchas diferencias entre los datos satelitales y las mediciones realizadas en diferentes meses, con un margen de error hasta 11 y  $16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Se determinó la correlación de Pearson y sus resultados para las diferentes estaciones de monitoreo se muestran en la tabla 3.

En el cálculo de la correlación de Pearson se pudo apreciar que los resultados fueron positivos pero los

más óptimos y cercanos a 1 fueron los logrados en CUBAENERGIA (rp = 0.69) y la media de todos los puntos (rp = 0.53).

### Resultados de PM10 y AOD - AQUA

A partir de los datos AOD se obtuvieron los gráficos de regresión que se muestran en la figura 7. Estos permitieron establecer la relación entre datos AOD - AQUA con PM10.

La tabla 4 nos brinda las ecuaciones de regresión obtenidas para las distintas dependencias.

Conocidos los valores equivalentes a PM10 de AOD - AQUA, se obtuvieron los gráficos que se muestran en la figura 8.

En la figura 8 se observa como los valores estimados por el satélite AQUA ofrecen mejores resultados que los obtenidos del MODIS - TERRA, principalmente en CUBAENERGIA, siguiendo el mismo comportamiento que los datos reales a lo largo de todo el año. Los valores estimados a partir de los datos satelitales fueron mayores que las mediciones reales durante todo el período de estudio.

Las incertidumbres más significativas en CUBAENERGIA fueron en los meses de febrero, marzo y diciembre en un rango de 8 y 11  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que en resto del año tuvo un comportamiento semejante al de las mediciones reales con un margen de error menos significativo.

Si se analiza la figura 9, que aporta los resultados de los índices de dispersión, se determina que, en las tres estaciones de mediciones y en la data de los valores medios entre todos los puntos, hubo una mínima dispersión entre los valores estimados a partir de los datos satelitales y mediciones reales. Esto significa que los valores estimados a partir de datos satelitales no están muy dispersos de las mediciones reales por lo que estos pueden ser utilizados para la evaluación de concentración de las partículas en el aire. En este caso sucede lo mismo que anteriormente en los resultados del MODIS-TERRA con el PM10 en el mes de julio en la CUJAE que puede estar influenciado por eventos locales.

Tabla 3. Valores de la correlación de Pearson entre PM10 y AOD - TERRA

| Correlación | CUBAENERGIA | CUJAE | INHEM | Media de todos los puntos |
|-------------|-------------|-------|-------|---------------------------|
| Valores     | 0.69        | 0.43  | 0.03  | 0.53                      |

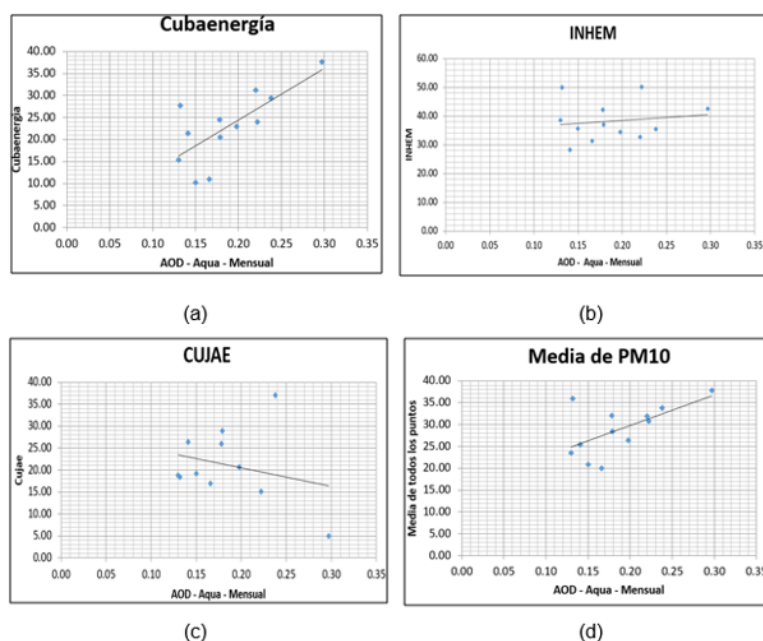
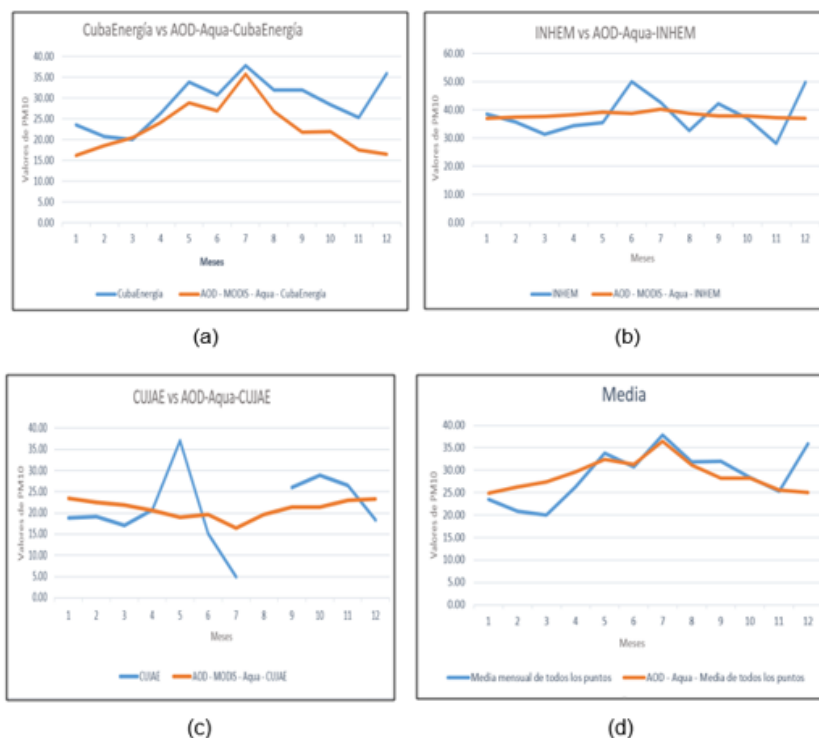


Figura 7. Regresión lineal para el PM10 a partir del AOD - AQUA: a) CUBAENERGIA, b) INHEM, c) CUJAE, d) Promedio de los tres lugares

Tabla 4. Ecuaciones de regresión para PM10 y AOD - AQUA

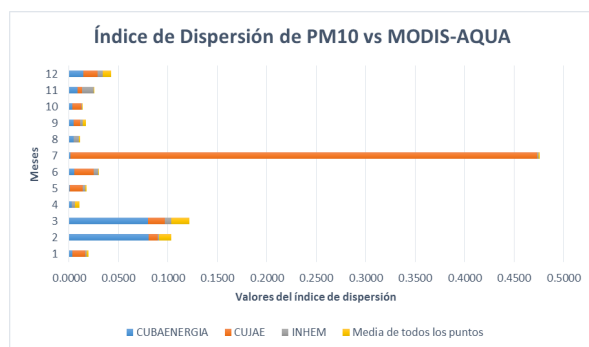
| Lugar       | Ecuación de regresión |
|-------------|-----------------------|
| CUJAE       | $y = -41.59x + 28.81$ |
| INHEM       | $y = 20.21x + 34.37$  |
| CUBAENERGIA | $y = 117.28x + 0.97$  |
| Media       | $y = 69.57x + 15.83$  |



**Figura 8.** Comparación de PM10 entre datos reales en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  y datos estimados por el satélite a partir del AQUA: a) CUBAENERGIA, b) INHEM, c) CUJAE, d) Promedio de los tres lugares.

**Tabla 5.** Valores de la Correlación de Pearson entre PM10 y AOD - AQUA

| Correlación | CUBAENERGIA | CUJAE | INHEM | Media de todos los puntos |
|-------------|-------------|-------|-------|---------------------------|
| Valores     | 0.72        | 0.10  | 0.15  | 0.60                      |



**Figura 9.** Gráfica de valores del Índice de Dispersión entre PM10 y AOD - AQUA

En la CUJAE e INHEM se obtuvo un resultado muy similar al presentado anteriormente por el MODIS - TERRA. Las diferencias mayores estuvieron en los meses de mayo, junio, agosto y diciembre. Este resultado puede estar asociado a que los datos satelitales son utilizados para determinar la concentración en un área determinada y no en un punto específico.

El valor de la correlación de Pearson, que se muestra en la [tabla 5](#), permite considerar que los resultados fueron positivos pero los más recomendables y cercanos a 1 fueron los conseguidos en CUBAENERGIA ( $r_p = 0.72$ ) y en la media de todos los puntos ( $r_p =$

0.60); obteniendo valores mejores que los obtenidos en la correlación con el MODIS - TERRA.

### Resultados para PM2.5

#### Resultados de PM2.5 y AOD - TERRA

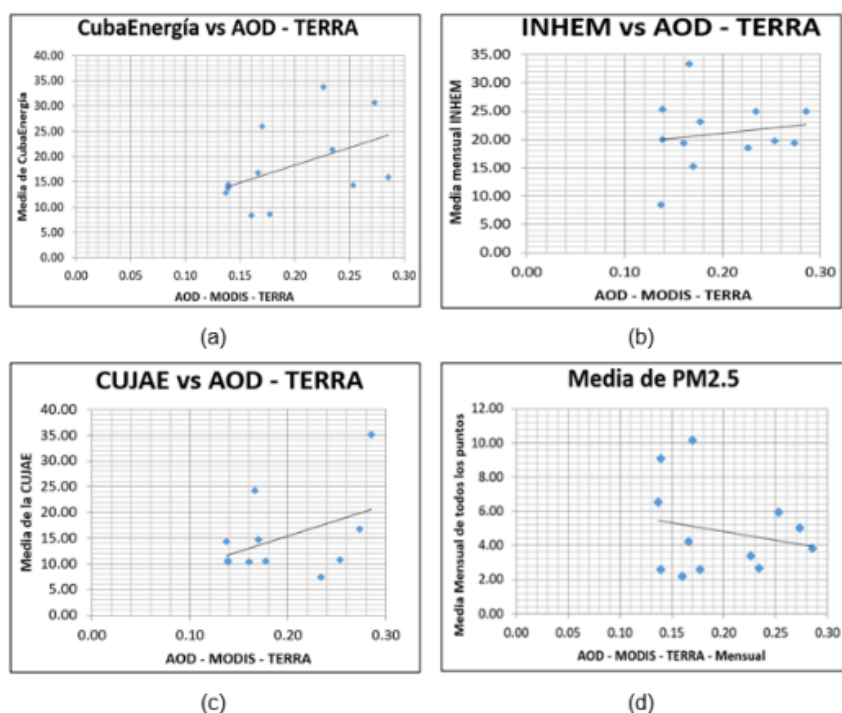
A partir de los datos AOD se obtuvieron los gráficos de regresión que se muestran en la [figura 10](#). Estos permitieron establecer la relación entre datos AOD - TERRA con PM2.5

La [tabla 6](#) nos brinda las ecuaciones de regresión obtenidas para las distintas dependencias.

Conocidos los valores equivalentes a PM2.5 de AOD - TERRA, se obtuvo los gráficos que se muestran en la [figura 11](#).

En la [figura 12](#) se presenta el índice de dispersión determinado entre los valores estimados a partir de los datos satelitales y los medidos en las diferentes estaciones, así como la media entre las tres. Los resultados muestran que se puede considerar aceptable la estimación para todas las estaciones de medición y en la media de todos los puntos, exceptuando en CUBAENERGIA que no se manifestó de forma equivalente durante todo el año.





**Figura 10.** Regresión lineal para el PM2.5 a partir del AOD - TERRA: a) CUBAENERGIA, b) INHEM, c) CUJAE, d) Promedio de los tres lugares

**Tabla 6.** Ecuaciones de regresión para PM2.5 y AOD - TERRA

| Lugar       | Ecuación de regresión |
|-------------|-----------------------|
| CUJAE       | $y = 61.32x + 3.16$   |
| INHEM       | $y = 17.56x + 17.58$  |
| CUBAENERGIA | $y = 69.78x + 4.37$   |
| Media       | $y = -10.20x + 6.85$  |

En CUBAENERGIA se observó que las mediciones reales sobrestimaron los datos satelitales en los meses de marzo, mayo y agosto donde se manifestaron picos significativos en un rango de 7 a 13  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , para el caso de los meses de abril, julio, octubre y noviembre los datos in situ fueron mayor que los estimados entre rangos de 7 y 8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Las diferencias en la CUJAE están justificadas por la sobrestimación a partir de los datos satelitales sobre las mediciones reales gran parte del año, las más significativas fueron en los meses de abril y junio con diferencias entre 7 y 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  exceptuando los meses de julio y septiembre que este caso los datos in situ son superiores a las satelitales entre 14 y 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En el INHEM las discrepancias fueron mínimas exceptuando los meses de enero y septiembre, para el caso de enero hubo una sobrestimación a partir de los datos satelitales sobre las mediciones reales de 11.53  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , y para el caso de septiembre es todo lo contrario fueron los datos in situ sobre los estimados con un valor de 12.82  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Para la media de todos los puntos se pudo observar que en febrero y marzo las mediciones reales sobrestiman los datos satelitales en un rango de error de 5 y 3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , la diferencia no es muy grande, pero si

es significativa y apreciable en los gráficos. Para el resto del año predominó gran analogía entre ambos de manera que las diferencias no superan los 3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

En la [tabla 7](#) se muestra la correlación de Pearson determinada para los distintos casos.

Esto arrojó que, aunque los datos en general no están muy dispersos, los que más se asemejan a las mediciones reales de PM2.5, teniendo en cuenta la correlación, fueron los obtenidos en CUBAENERGIA ( $r_p = 0.46$ ) y en la media de todos los puntos ( $r_p = 0.42$ ). Estas correlaciones fueron las más cercanas a uno, por lo tanto, son correlaciones positivas casi perfectas, lo que indica que las mediciones satelitales sirven para determinar un estimado de la concentración de PM2.5 en un área de estudio.

### Resultados de PM2.5 y MERRA-2

En la [figura 13](#), se presentan los resultados obtenidos de la comparación de la media de todos los puntos de las mediciones reales con los estimados a partir de los datos satelitales del producto de la Nasa MERRA-2.

La [figura 13](#) muestra la comparación realizada entre las mediciones reales de PM2.5 y la concentración en superficie de PM2.5 del MERRA-2. Se puede obser-

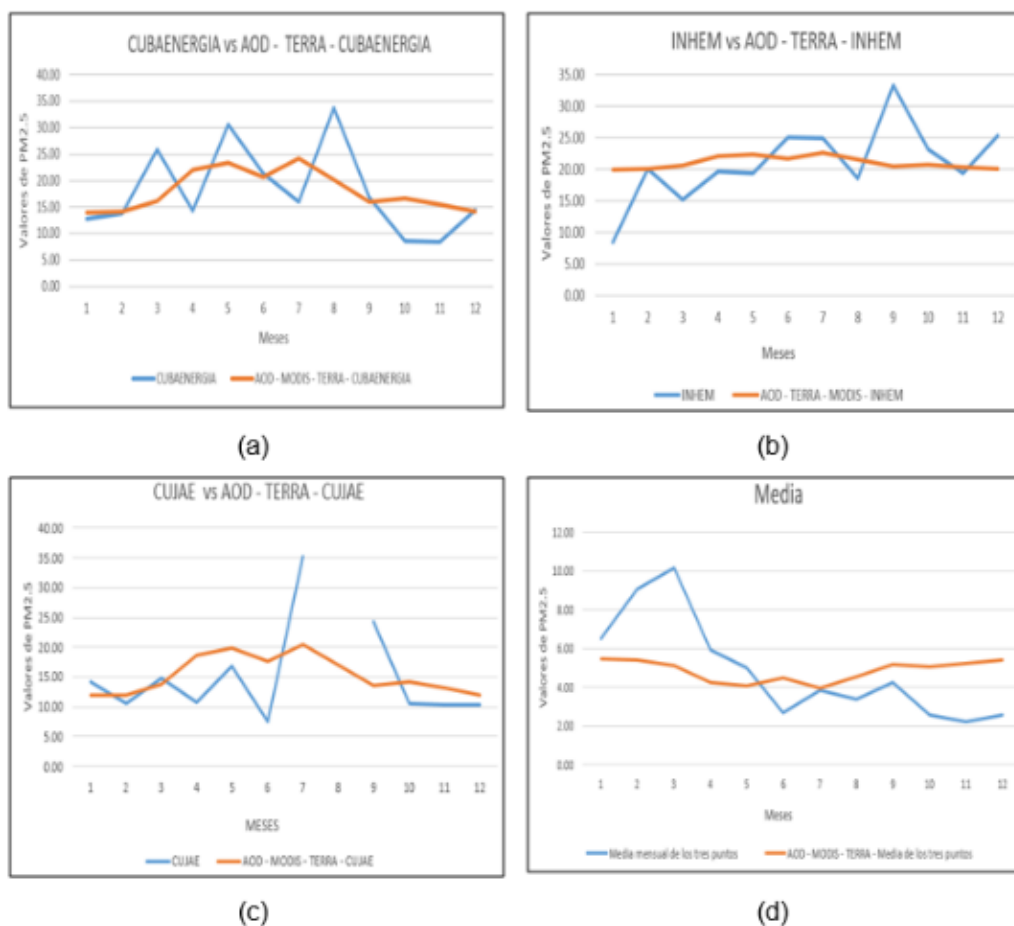


Figura 11. Comparación de PM2.5 entre datos reales µg/m3 y datos estimados por el satélite a partir del TERRA: a) CUBAENERGIA, b) INHEM, c) CUJAE, d) Promedio de los tres lugares.

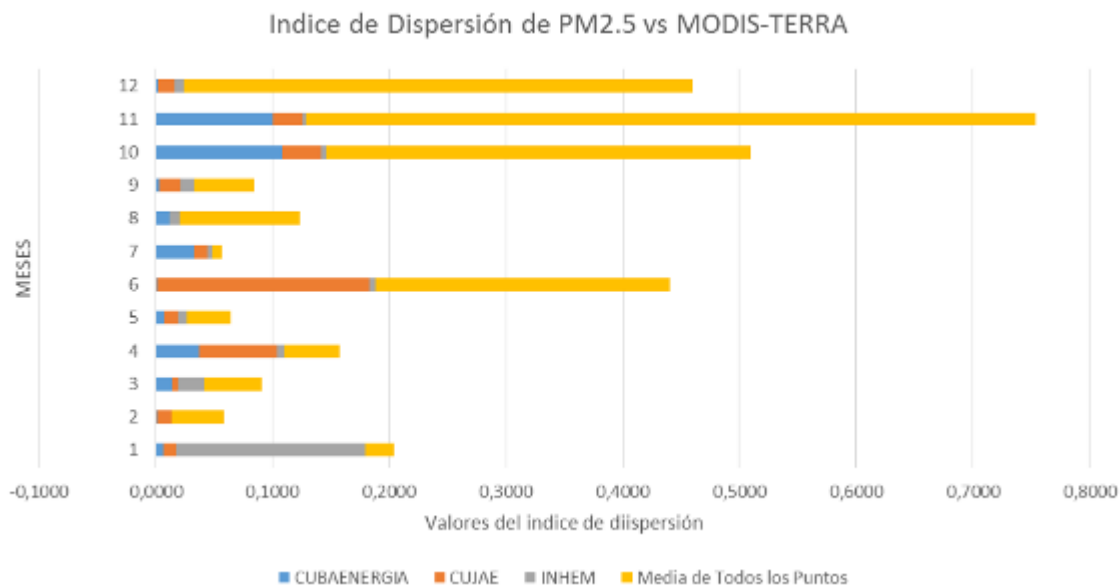
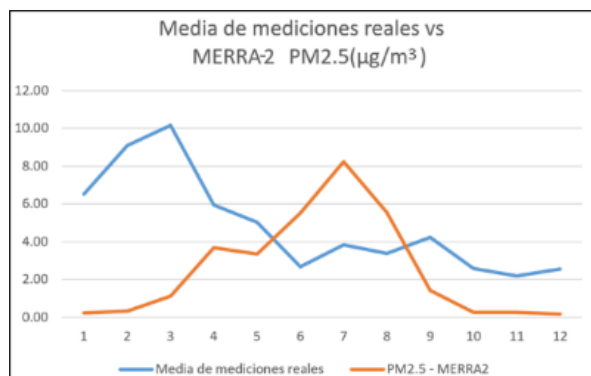


Figura 12. Gráfica de valores del Índice de Dispersión entre PM2.5 y AOD - TERRA

Tabla 7. Valores de la Correlación de Pearson entre PM2.5 y AOD - TERRA

| Correlación | CUBAENERGIA | CUJAE | INHEM | Media de todos los puntos |
|-------------|-------------|-------|-------|---------------------------|
| Valores     | 0.46        | 0.25  | 0.16  | 0.42                      |

var que entre ellos no hay ningún tipo de similitud o vínculo alguno, pues los comportamientos son totalmente contrarios. Los valores de mediciones reales fueron mayores a los estimados para los primeros meses del año mientras que los valores estimados a partir de los datos satelitales sobrestimaron a los reales en los meses de verano siendo un poco más análogos en los meses de octubre, noviembre y diciembre. Estos resultados van acompañados del cálculo de la correlación de Pearson ( $r_p = -0.241$ ) la cual resultó ser un valor negativo.



**Figura 13.** Gráfico de comparación entre la media de todos los puntos de PM2.5 y la concentración en superficie de PM2.5 del MERRA-2

## CONCLUSIONES

Acabado el análisis de las mediciones in situ de material particulado en los tres puntos de estudios; durante el año 2012, se concluyó que la estación que midió mayor concentración de PM10 y PM2.5 fue la ubicada en el Instituto de Higiene, Epidemiología y Microbiología.

De la relación entre los valores estimados a partir de los datos satelitales con las mediciones in situ se ultimó que:

- Los datos de concentración de PM2.5 en superficie del producto satelital MERRA-2 no son los más adecuados para poder evaluar contaminación atmosférica por PM2.5 ya que se comportan de manera contraria durante todo el año lo cual se evidencia con la correlación de Pearson que dio como resultado un valor negativo ( $r_p = -0.24$ ).
- La concentración de PM10 puede ser estimada tanto por MODIS-TERRA como por AQUA, aunque fueron más precisos los resultados del MODIS - AQUA pues la correlación de PM10 con el MODIS - AQUA ( $r_p = 0.60$ ) dio un valor superior al del TERRA ( $r_p = 0.53$ ).
- Para la estimación de PM2.5 se pueden utilizar los datos obtenidos del MODIS -TERRA pues la correlación lineal calculada indicó que  $r_p = 0.42$ .

Aunque realizar mediciones de material particulado siempre es la primera opción se puede afirmar que el empleo de datos satelitales, en específico los de AOD, son pertinentes para la estimación de la contaminación atmosférica por material particulado en La Habana, siendo más exactos los datos extraídos del satélite AQUA.

## REFERENCIAS

- Duncan, b. et al., 2014. Satellite data of atmospheric pollution for u.s. air quality applications: examples of applications, summary of data end-user resources, answers to faqs, and common mistakes to avoid. *Atmospheric environment*, issue 94, pp. 647-662.
- EPA, 2005. *Revision to the Guideline on Air Quality Models: Adoption of a Preferred General Purpose (Flat and Complex TERRAin) Dispersion Model and Other Revisions. 40 CFR Part 51. Rules and Regulations*
- Guevara-Luna, M., Guevara-Luna, F., Mendez, J. & Belalcazar, L., 2018. Spatial and temporal assessment of particulate matter using AOD data from MODIS and Surface Measurements in the Ambient Air of Colombia. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 2(12), p. 165.
- Molina, E., Turtós, L., Meneses, E. & Alonso, D., 2017. Comportamiento de las fracciones PM10 y PM2.5 en tres zonas de La Habana (2012). *Higiene y Sanidad Ambiental*, 4(17), pp. 1553-1564.
- Oficina Nacional de Normalización, 2014. *NC 1059:2014 Calidad del aire — metodología para modelar las afectaciones de la calidad del aire a escala local debido a las emisiones de contaminantes atmosféricos desde fuentes fijas*. La Habana
- Saunders, R., Kahl, J. & Ghorai, J., 2014. Improved estimation of PM2.5 using Lagrangian satellite-measured aerosol optical depth. *Atmospheric Environment*, Issue 91, pp. 146-153.
- Scire, J., Robe, F., Fernau, M. & Yamartino, R., 2000. *A User's Guide for the CALMET Dispersion Model (Version 5)*. EarthTech. Inc., Concord, MA.
- Turtós, L., Meneses, E., Molina, E. & Alonso, D., 2012. *Informe Final, Implementación y aplicación de modelos detallados para evaluar de la contaminación atmosférica regional (50-300 km).*, Ciudad de La Habana: GIA, CUBAENERGIA.
- Wald, L. & Baleynaud, J., 1999. Observing air quality over the city of Nantes by means of Landsat thermal infrared data. *International Journal of Remote Sensing*, 20(5), p. 947-959.

*Veronica Gutiérrez Quintero.* Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía. E-mail: [veronica@cubaenergia.cu](mailto:veronica@cubaenergia.cu)

*Elieza Menezes Ruiz.* Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía. E-mail: [emeneses@cubaenergia.cu](mailto:emeneses@cubaenergia.cu)

*Alina Roig Rassi.* Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía. E-mail: [arrassi@cubaenergia.cu](mailto:arrassi@cubaenergia.cu)

*Marco Andrés Guevara Luna.* Universidad Nacional de Colombia

*Luis Carlos Belalcazar.* Universidad Nacional de Colombia

**Conflictos de intereses:** Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés.

**Contribución de los autores:** Concepción de la idea: **Elieza Menezes Ruiz, Luis Carlos Belalcazar** Obtención de datos: **Veronica Gutiérrez Quintero, Marco Andrés Guevara Luna.** Elaboración del artículo: **Veronica Gutiérrez Quintero, Alina Roig Rassi.** Revisión crítica: **Elieza Menezes Ruiz**

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)