

Evaluación de la calidad del aire en la Bahía del Mariel con el modelo CALPUFF

Air quality evaluation in Mariel Bay using CALPUFF model



CU-ID: 2377/v28n1e06

✉ Roger David Ramírez-Plasencia^{1*}, ✉ Anel Hernández-Garces², ✉ Adrian Luis Ferrer-Hernández¹

¹Instituto de Meteorología de la República de Cuba, La Habana, Cuba

²Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba

RESUMEN: La modelación de la calidad del aire juega un papel esencial para cuantificar los valores máximos permitidos para las concentraciones de contaminantes. Este trabajo utiliza un sistema de modelación compuesto por un modelo diagnóstico meteorológico (CALMET), con un modelo de dispersión para la calidad del aire (CALPUFF), a partir de las salidas diagnóstico del modelo Weather Research and Forecasting (WRF). El objetivo general es evaluar el estado de la calidad del aire en la bahía del Mariel mediante el uso de este sistema de modelación, a partir de las emisiones de fuentes fijas. Se verifica el cumplimiento de la norma cubana de calidad del aire NC 1020:2014 para monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂) y material particulado de 10 µm (PM₁₀) desde el 18/5/2015 hasta el 21/5/2015. Las máximas concentraciones horarias de PM₁₀ superiores a lo normado se localizaron sobre el Consejo Popular (CP) Mariel con valores superiores a los 206 µg/m³ en horarios del día, influenciados por la brisa de mar. Las concentraciones horarias de SO₂ superaron la norma en 3,9 veces, con concentraciones horarias de 800 a 900 µg/m³ durante la noche y la madrugada favorecidos por la influencia de la brisa de tierra. Se apreció una sobrestimación del modelo para el PM₁₀ por la inexistencia de datos meteorológicos en el área de estudio que alimentaran CALMET, y debido a que la obtención de los valores de emisión está basada en procesos industriales que no reflejan los verdaderos volúmenes emitidos.

Palabras clave: Contaminación Atmosférica, Modelación de la Calidad del Aire, CALMET/CALPUFF.

ABSTRACT: Air quality modeling is an important tool to determine the maximum allowable emission rates that will meet air quality standards. This research uses a modeling system composed of a meteorological diagnostic model (CALMET), with an air quality dispersion model (CALPUFF), based on the diagnostic outputs of the Weather Research and Forecasting (WRF) model. This research is aimed to evaluate air quality in Mariel Bay from point sources emissions, by using these models. It is verified the Cuban Air Quality Standard 1020:2014 for carbon monoxide (CO), nitrous oxides (NO_x), sulfur dioxide (SO₂), and 10 µm particulate matter (PM₁₀) from 5/18/2015 to 5/21/2015. The hourly peak concentrations of PM₁₀ take place over the Mariel community with values of 206 µg/m³ during the day, caused by sea breeze. The hourly concentrations of SO₂ exceed 3.9 times the standard, with hourly peak concentration between 800 to 900 µg/m³ during nights and early mornings due to land breeze. Comparison of real data and model-based prediction shows an overestimation of CALPUFF for PM₁₀ due to the absence of meteorological data in the domain and the use of industrial emission values based on estimations.

Key words: Air Pollution, Air Quality Modeling, CALMET/CALPUFF.

INTRODUCCIÓN

La modelación de la calidad del aire constituye una herramienta útil en zonas carentes de mediciones a las inmisiones de contaminantes, en las evaluaciones de impacto y responsabilidad originados por uno o varios focos de emisión, en la predicción de la contaminación potencial y en el establecimiento o cumplimiento de las legislaciones de las normas de calidad del aire (Seinfeld & Pandis, 2006).

Poblaciones expuestas a altos valores de contaminantes como: monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂) o material particulado (PM₁₀), tienden a desarrollar enfermedades cardiovasculares, respiratorias, circulatorias, oncológicas; en una mayor incidencia entre niños y personas de la tercera edad (Oyarzún, 2010). Los efectos adversos de estas sustancias dependen de su concentración, duración a la exposición y susceptibilidad de las personas expuestas.

*Autor para correspondencia: Roger David Ramírez-Plasencia. E-mail: rgrdvramirez@gmail.com

Recibido: 01/06/2021

Aceptado: 03/01/2022

El sistema de modelación CALMET/CALPUFF es recomendado por la EPA (Levy et al., 2002) para la caracterización del transporte y dispersión de contaminantes. Tanto el modelo meteorológico CALMET, como el modelo lagrangiano de puffs CALPUFF son implementados y sus predicciones validadas en diferentes estudios (Dresser & Huizer, 2011; González et al., 2015; Hernández et al., 2015; Murena et al., 2018; Rood, 2014).

El acoplamiento entre un modelo meteorológico mesoescalar como el WRF con CALMET/CALPUFF permite obtener una mejor descripción del comportamiento de la atmósfera y de variables meteorológicas como la velocidad y dirección del viento, la lluvia, la temperatura y los criterios de estabilidad (Hernández et al., 2014); que sirven de condiciones de frontera para la inicialización tanto de CALMET como CALPUFF. Además, brinda información sobre el comportamiento vertical de la atmósfera cuyas mediciones pudieran dificultarse. El acoplamiento del WRF con modelos de calidad del aire, WRF/CALMET/CALPUFF ha sido utilizado (Hernández et al., 2017; Radonjic et al., 2011; Souto et al., 2014). Sin embargo, otros autores emplean el acoplamiento WRF/AERMOD (Huang & Guo, 2019; Turtos et al., 2013). En ambas configuraciones obtienen representaciones de los campos de las variables meteorológicas, los penachos de las sustancias emitidas y los valores de inmisión.

El modelo diagnóstico CALMET, puede ser alimentado tanto con WRF, como con mediciones in situ de las variables meteorológicas. La combinación de ambos datos de entrada puede proporcionar resultados superiores en cuanto al comportamiento real de la atmósfera (Hernández et al., 2016). CALMET parametriza los flujos en pendiente, los efectos cinemáticos y de bloqueo del terreno, muy práctico para zonas con orografía compleja. Incluye, además, un modelo micro meteorológico de capa límite sobre tierra y cuerpos de agua donde refleja las interacciones costeras de variables como el viento, la estabilidad o la penetración de la pluma (Scire, Robe, et al., 2000). Este modelo opera en dos etapas, en la primera se genera el campo de vientos a partir de interpolación a las mediciones o a un campo de viento inicial generado por un modelo meteorológico como el WRF y se ajusta a los efectos del terreno. El segundo paso consiste en introducir las propias mediciones para finalmente obtener el campo de vientos diagnóstico.

El modelo lagrangiano de puffs CALPUFF opera basado en la consideración a la emisión como: puffs, bocanadas o paquetes discretos para las sustancias. Entre sus principales características se destacan que es un modelo no estacionario, multicapas y multiespecies, que puede simular los efectos, temporales y espaciales de las condiciones meteorológicas en el transporte, la transformación y la deposición de contaminantes en la atmósfera. El modelo CALPUFF con-

tiene algoritmos que consideran diversos fenómenos: efectos en la cercanía de los focos emisores, flujo descendente tras obstáculos, elevación del penacho en zonas de transición meteorológica, penetración parcial del penacho sobre la capa de mezcla e interacciones del terreno a escala submalla. Incluye, además, efectos a largo plazo, como la deposición de contaminantes (deposición húmeda o seca), transformación química, la cizalladura vertical del viento, las interacciones costeras y las singularidades del transporte sobre masas de agua. CALPUFF también puede simular variaciones arbitrarias de las emisiones y contiene diferentes opciones para el tratamiento de los procesos físicos de los contaminantes en la atmósfera, en diferente nivel de detalle en función de la aplicación del modelo (Scire, Strimaitis, et al., 2000).

Esta investigación complementa otros estudios anteriores de calidad del aire en la región (Sosa, 2018) y a su vez incorpora una herramienta de modelación novedosa en el área, que incluye un mejor tratamiento de la dispersión bajo condiciones meteorológicas influenciadas por la bahía del Mariel y su línea de costa. El interés económico que existe en esta localidad, así como la creciente actividad industrial justifican la importancia de estos estudios como el que se presenta, para alcanzar en esta zona un verdadero desarrollo sostenible.

El objetivo general de este trabajo es evaluar el estado de la calidad del aire en la Bahía del Mariel mediante el uso del sistema de modelación WRF/CALMET/CALPUFF en el período comprendido entre el 18 al 21 de mayo del 2015.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El estudio se realizó en la bahía del Mariel, perteneciente al municipio homónimo, localizado en la costa norte de la occidental provincia de Artemisa. El dominio de la modelación abarcó un área de 20 km en la dirección zonal, por 20 km en la dirección meridional, que sobrepasan tanto los propios límites de la bahía como los administrativos del municipio. Se enmarca por tanto en un área de 400 km².

El relieve del lugar no es complejo, pues se encuentra sobre una llanura costera. Las interacciones entre las circulaciones locales, como la brisa de mar y de tierra poseen un papel principal en cuanto al comportamiento del viento a esta escala. En los días de estudio Cuba se encontraba bajo una débil influencia del Anticiclón Subtropical del Atlántico Norte, esta situación imponía gradientes débiles sobre todo el país. Debido a esto, los vientos sobre el área de interés se comportaron variables y débiles, con direcciones que oscilaron entre el nordeste y el este producto a la influencia de este régimen sinóptico.

Tabla 1. Ubicación de los receptores fijos

Receptor	Ubicación UTM		Coordenadas geográficas	
	X (km)	Y (km)	Longitud (N)	Latitud (W)
Receptor 1 Consejo Popular (CP) Mariel	319,728	2 543,744	22.99 226	82.758 775
Receptor 2 Consejo Popular (CP) La Boca	321,715	2 546,422	23.016 654	82.739 707
Receptor 3 (ZEDM)	318,7014	2 546,987	23.021 43	82.769 169

Dominio

Se utilizaron datos en coordenadas UTM, la zona UTM es la 17N. Se seleccionó la zona de estudio, con coordenadas desde SW (X= 311 km; Y=2 534 km) hasta NE (X=331 km; Y=2554 km). La información de usos de suelos trabajó con una resolución de 1000 m y fue obtenida a partir de la base de datos de América del Norte del cubrimiento del suelo versión 2.0 (USGS). Para la información del relieve y la topografía se trabajó con el modelo de elevación digital SRTM3 con una resolución de 90 m.

Configuración del modelo meteorológico WRF

Las simulaciones realizadas con el modelo WRF fueron alimentadas cada 6 horas con datos análisis del modelo global GFS de 0.5 grados de resolución espacial¹. Con estos datos análisis se crearon las condiciones iniciales y de fronteras para los dominios de simulación y en todo el periodo de estudio. Para esto se empleó el núcleo ARW del modelo WRF (versión 3.8.1), utilizando las configuraciones de dominios y parametrizaciones físicas descritas por Sierra-Lorenzo et al. (2017), para el Sistema de Pronóstico Inmediato (SisPI) implementado de forma operativa en Instituto de Meteorología de Cuba. Esta configuración está compuesta por 3 dominios de resoluciones espaciales de 27, 9 y 3 km, siendo este último dominio el utilizado para alimentar el modelo CALMET/CALPUFF.

Con el objetivo de reducir el tamaño de la rejilla tridimensional proporcionada por el WRF y además transformar las salidas para una adecuada asimilación por el procesador meteorológico CALMET se utiliza la herramienta CALWRF (Hernández et al., 2014). Esta, opera con las salidas en formato netCDF del modelo WRF, extrayendo y reconfigurando un subconjunto de los campos de la rejilla tridimensional del modelo, lo cual permite crear el fichero "3D.dat" para ser inicializado en CALMET.

Configuración de CALMET

La rejilla se creó con una resolución de 100 m, contó con 10 niveles de altura (desde 0 hasta 4 000 m) y cubre el dominio mostrado en la Figura 1. El período de la modelación comprende desde el 18 de mayo a las 06:00 UTC hasta el 21 de mayo a las 19:00 UTC del 2015.). En la investigación, el modelo CALMET solo fue alimentado con datos del modelo

WRF debido a la ausencia de observaciones meteorológicas en el área de estudio. Durante esta etapa de pre-procesamiento fueron empleadas las salidas diagnóstico del WRF para obtener una descripción tridimensional de los campos de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, y otras variables como la cobertura nubosa, la altura de la capa de mezcla, y la precipitación. El campo de vientos fue ajustado a los efectos cinemáticos y los flujos en pendiente del terreno. La altura de la capa de mezcla diurna o convectiva fue calculada utilizando la modificación de Maul (Maul, 1980) al método de Carson (Carson, 1973), dependientes del flujo de calor sensible y del perfil vertical de temperaturas.

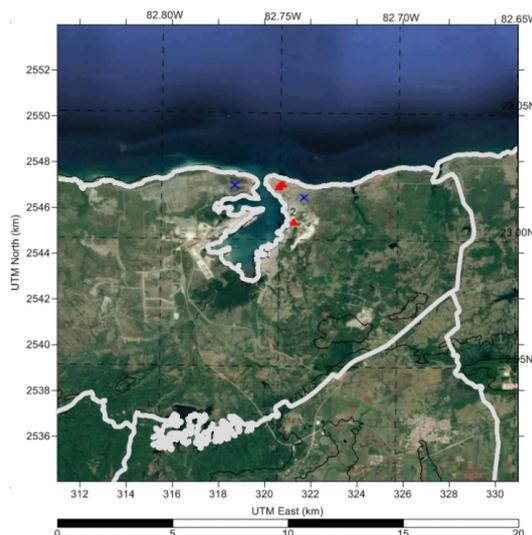


Figura 1. Dominio de la modelación

Configuración de CALPUFF

Las fuentes emisoras fueron del tipo puntuales: la termoeléctrica Máximo Gómez (FE1), la Fábrica de Cemento René Arcay / Empresa Mixta Cementos Cuzarazo N.V (FE2) y la batería de grupos electrógenos de la termoeléctrica (FE3).

Se seleccionaron los receptores, del tipo discreto y en forma de rejilla, donde se obtuvo los valores de las concentraciones de los contaminantes emitidos. Tres receptores discretos se ubicaron (Tabla 1) en la periferia de la bahía del Mariel para observar el comportamiento de las concentraciones de CO, SO₂, NO_x y PM₁₀, sus valores máximos y el peligro potencial que pudiesen presentar los habitantes y trabajadores de la zona bajo estas concentraciones.

Para conocer los volúmenes de emisiones de contaminantes en la zona de estudio se emplearon los valores determinados por Sosa (2018), en un inventario de emisiones basados en los procesos industriales que estimó los valores anuales de emisión en la zona. Las características técnicas de las fuentes de emisión como: la velocidad y temperatura de salida de los gases, altura y diámetro de la chimenea fueron obtenidas a partir de datos proporcionados por las propias industrias.

Metodología para la validación

Mediante el uso de estadígrafos se evaluó la precisión de las estimaciones de CALPUFF, al contrastarlos con datos obtenidos en una campaña de muestreo para el PM₁₀ realizada por investigadores de Centro de Contaminación del INSMET (CECONT) en el área de estudio. Se empleó un equipo que mide el material particulado marca Thermo Scientific MIE ADR-1500 y se obtuvieron valores de concentración (en µg/m³) minuto a minuto.

Para realizar la validación de CALPUFF se emplearon los estadígrafos:

- *BIAS* proporcionó la media de la diferencia entre el valor estimado y el valor real

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - M_i)}{N}$$

- El error cuadrático medio normalizado o NMSE

$$NMSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - M_i)^2 / \bar{P}\bar{M}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento de la altura de la capa de mezcla

Se calculó la altura de la capa de mezcla a través de los modelos WRF y CALMET, como se muestra en la Figura 2. La elaborada por CALMET es, en promedio menor, que la del WRF debido que el método implementado en CALMET considera los efectos locales del relieve, la orografía y los flujos de calor. En este caso la curva calculada con las salidas de WRF fue empleando el método de Holzworth (Holzworth, 1964, 1967).

La variabilidad diaria en el comportamiento de su altura se produce como respuesta a los procesos de estabilidad vertical que se presentan en el día. Los menores valores se observan en horas de la madrugada y en las primeras horas de la mañana bajo condiciones más estables que inhiben o mitigan el mezclamiento vertical, con velocidades del viento entre 2 a 3 m/s o inferiores. Los máximos valores de la altura son producidos cercanos al mediodía donde la inestabilidad es mayor, el mezclamiento vertical está favorecido y las velocidades del viento son mayores. Esto conduce

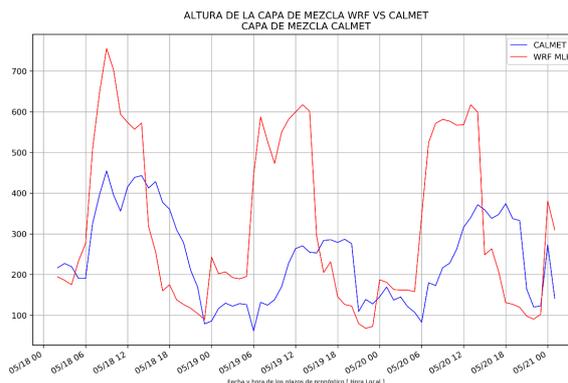


Figura 2. Comportamiento de la altura de la capa de mezcla simulada por CALMET y elaborada por WRF desde las 02:00 horas del 18/05/2015 hasta las 11:00 horas del 21/05/2015

a que los mayores valores de inmisión, alcanzando los máximos valores absolutos que se reportan para CO, SO₂ y NO_x, son producidos en la madrugada y las primeras horas de la mañana, con penachos muy dispersos.

Comportamiento de la velocidad y dirección del viento

El comportamiento general y la variabilidad horaria de los penachos de las especies modeladas responden a la dirección predominante del viento. Además, el barrido diario de estos se produce en consecuencia de la circulación mesoescalar de la brisa de mar y el terral, que se aprecian en la simulación de CALMET. En la Figura 3 se ilustra el comportamiento de la velocidad del viento (m/s) tanto para el obtenido por el modelo CALMET, como para el WRF a 10 m de altura. Los valores obtenidos por CALMET son siempre inferiores a los del WRF debido a la serie de procesos a escala local como los relacionados a la orografía, usos de suelo, edificaciones, efectos de bloqueo y flujos en pendiente del relieve que son considerados.

Episodios potenciales de contaminación se producen en presencia de días consecutivos sin lluvias, velocidades del viento por debajo de 4 m/s y alturas de la capa de mezcla inferiores a 1 500 m, estas condiciones sostenidas por dos o más días (López, 2006). En este estudio las velocidades más bajas tanto del viento, como de la altura de la capa de mezcla se reportan en horas de la madrugada, pero vuelven a tomar valores superiores, en las horas del día. Precisamente en el horario nocturno se alcanzan las máximas concentraciones de SO₂ y NO_x con penachos mucho más dispersos que por el día, produciendo mayores áreas de afectación; sin embargo, la dirección predominante del viento producto de la brisa de tierra, hace que estas zonas se localicen próximas a la costa o dentro del mar. En horas de la noche el comportamiento de la estratificación vertical es estable, situación en la cual el movimiento vertical de los contaminantes está inhibido y se reportan por consiguiente las mayores

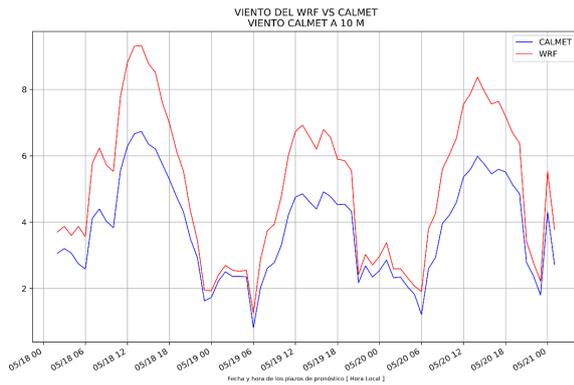


Figura 3. Comportamiento de la velocidad del viento a 10 m por los modelos CALMET y WRF desde 18/05/2015 hasta 21/05/2015

afectaciones. Por otra parte, los valores máximos de PM_{10} fueron obtenidos independientemente de estas consideraciones reportando valores máximos en diferentes horarios.

Comportamiento horario de las concentraciones

Respecto a los valores de concentración de CO, son pequeños y en ninguno de los casos en la modelación para esta sustancia, sobrepasaron los valores umbrales de la NC 1020:2014. Esta sustancia no presenta un peligro a causa de las emisiones que se consideraron. Sin embargo, el transporte vehicular es una importante fuente de CO que pudiese ocasionar afectaciones, sin embargo, no es tenido en cuenta en este estudio.

En la **Figura 4a** el penacho tuvo una orientación desde el sudeste en horas de la madrugada. En este horario la mayor zona afectada por PM_{10} resulta ser la ZEDM, a 2 km al oeste de la FE2 donde se alcanzan valores de 200-300 $\mu g/m^3$ que engloba la isolínea 200 $\mu g/m^3$ en un área de 1,7 km^2 superando lo normado para esta especie. Sin embargo, esta situación no representa un peligro potencial a la población pues no constituye una zona habitada, aunque si afectará el

medio ambiente. En la **Figura 4b** el penacho estaba orientado desde el nordeste en consecuencia con la dirección del viento desde esta región y en las proximidades del CP Mariel se superó también lo normado para esta sustancia en este horario.

El día 21/05/2015 a las 09:00 horas en las proximidades del CP Mariel se alcanzaron 206 $\mu g/m^3$ de PM_{10} , evento que se manifestó también el 18/05/2015 entre 11:00 hasta las 13:00 horas, el 19/05/2015 entre las 08:00 y las 17:00 horas y el 20/05/2015 desde las 09:00 hasta las 17:00 horas provenientes de la FE2 donde los valores superaron la NC 1020:2014 para esta sustancia.

La distribución espacial de esta sustancia obtenida mediante la modelación evidencia que la mayor afectación la produce sobre el CP Mariel y proviene de la FE2. Esta fuente constituye, por tanto, el principal emisor de material particulado total en el área, atendiendo a sus volúmenes anuales de emisión y los valores reportados en el estudio que superan lo normado.

En la **Figura 5** se muestra la concentración de SO_2 para dos intervalos de tiempo. El penacho en estos horarios tuvo una orientación norte-sur y las máximas concentraciones fueron obtenidas en el interior de la bahía del Mariel. El 19 de mayo a las 13:00 horas (ver **Figura 5a**) a 4,1 km al SE de las FE1 y FE3 se alcanzó un valor de 992 $\mu g/m^3$ para esta sustancia en el interior de la Bahía del Mariel, valor el cual supera la norma 3,9 veces. El día 21 a las 11:00 horas (ver **Figura 5b**) se presentó otro evento de alta concentración sobre el CP Mariel donde se alcanzó un valor de 842 $\mu g/m^3$ superando la norma.

Los episodios de contaminación para esta sustancia se producen debido a la dirección del viento predominante, con una velocidad promedio de 3,71 m/s. Además, los elevados valores de inmisión reportados en la modelación ocurren debido a que la FE1 es la principal fuente de emisión para esta sustancia en el área de estudio. La quema de combustibles fósiles con

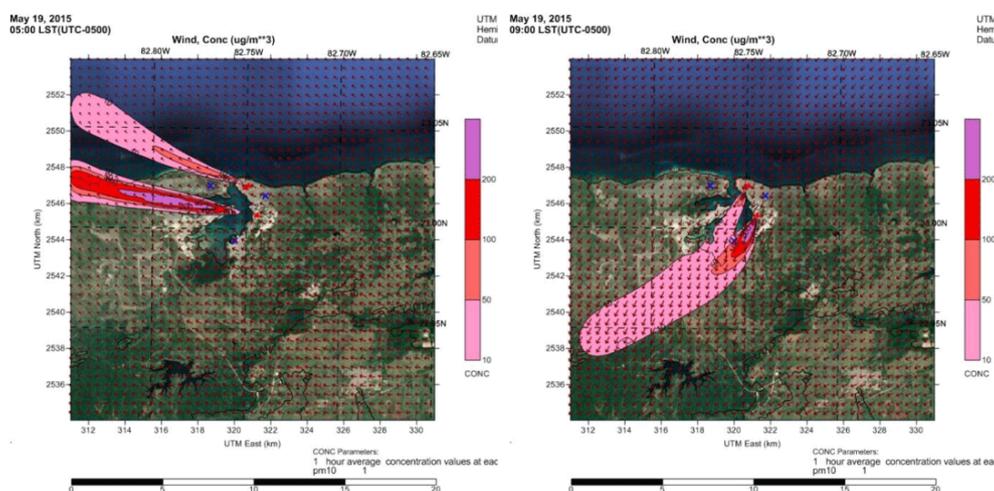


Figura 4. Comportamiento de la dirección del viento en 10 m y los valores de inmisión de PM_{10} en los días; **(a)** 19/05/2015 a las 05:00 horas y **(b)** 19/05/2015 a las 09:00 horas.

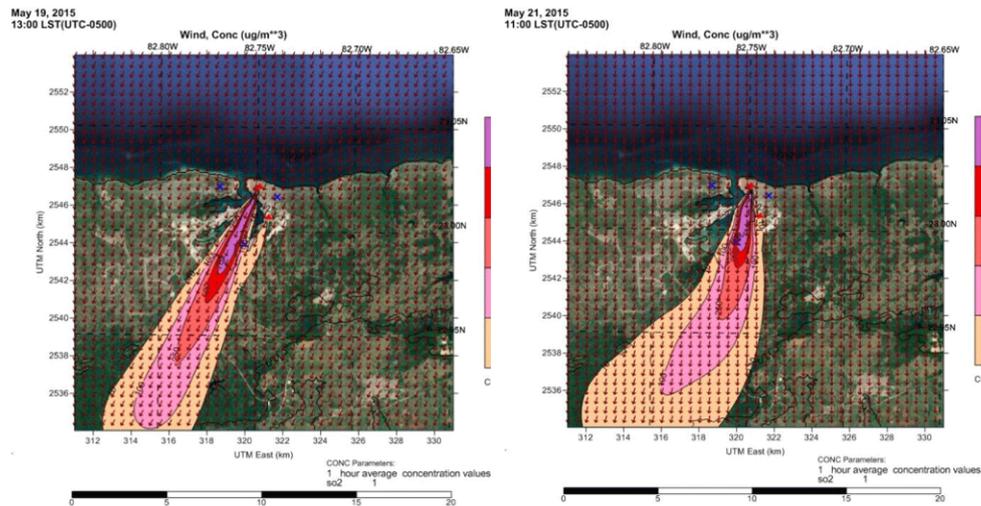


Figura 5. Comportamiento de la dirección del viento en 10 m y los valores de inmisión para el SO_2 en los días; **(a)** 19/05/2015 a las 13:00 horas y **(b)** 21/05/2015 a las 11:00 horas.

alto contenido de azufre, como el que se emplea en Cuba para la producción de energía eléctrica en las centrales termoeléctricas constituye la fuente principal del azufre que finalmente terminaría como SO_2 . El petróleo extraído en Cuba tiene alto contenido en azufre y es el empleado para la producción eléctrica (Prieto et al., 2017).

Como se muestra en la Figura 6a el día 19/05/2015 a las 01:00 horas en una amplia área de aproximadamente $6,8 \text{ km}^2$ se perciben concentraciones de NO_x superiores a los $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ provenientes de las FE1 y FE3, superando los valores establecidos en la NC 1020:2014. Mientras que el día 20/05/2015 a las 23:00 horas (ver Figura 6b) en una amplia área de $3,1 \text{ km}^2$ desde las FE1 y FE3 en dirección SW que se extiende $7,6 \text{ km}$ se produce otro incumpliendo de la norma. Todos estos eventos mostraron valores superiores a $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Sobre el CP Mariel, los mayores valores de las concentraciones de todos los contaminantes modelados se aprecian en las horas del día cercanas al mediodía, entre las 11:00 y las 17:00 horas donde pueden alcanzar cada contaminante sus máximos valores absolutos, en presencia de penachos rectilíneos poco dispersos. Esto se produce debido a los vientos de N y del NE que favorecen la inmisión en la zona desde todas las fuentes y para distintos valores de velocidades que oscilaban entre $0,81 \text{ m/s}$ a las 06:00 horas del 19/05/2015 y $6,73 \text{ m/s}$ a las 14:00 horas 18/05/2015. Los mayores valores de concentraciones de todos los contaminantes sobre la ZEDM se perciben desde las horas de la noche y hasta las horas finales de la mañana como respuesta a la marcha diaria del teral y la brisa de mar, desde todas las fuentes.

Sin embargo, debido a la componente promedio del viento en la región del NE-E, según la climatología

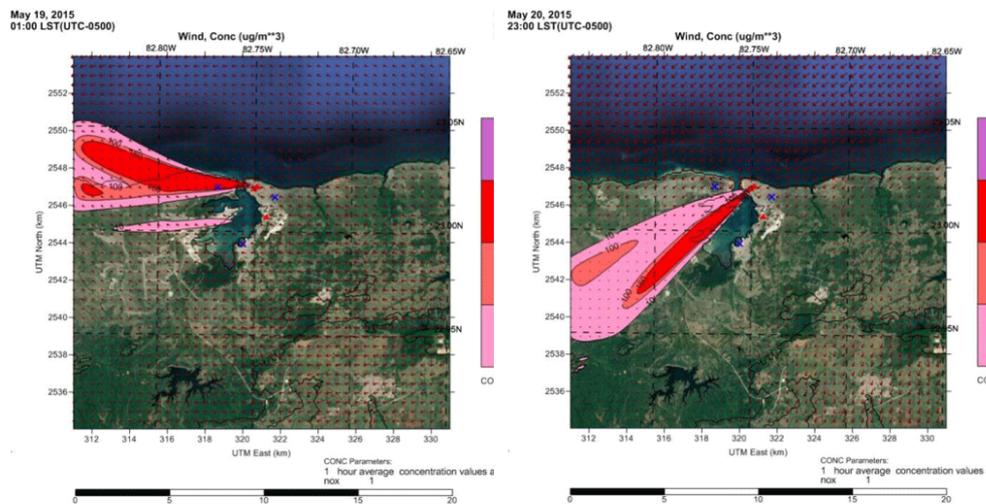


Figura 6. Comportamiento de la dirección del viento en 10 m y los valores de inmisión para el NO_x en los días; **(a)** 19/05/2015 a las 01:00 horas y **(b)** 20/05/2015 a las 23:00 horas.

(INSMET, 2015), este comportamiento para los penachos debiera presentarse de forma muy frecuente. Por tanto, las industrias ubicadas en la bahía deberían tener otra orientación, preferiblemente al oeste de las zonas habitadas, no al este o al norte como ocurre.

Comportamiento de las concentraciones en los receptores discretos

Se puede apreciar en la Figura 7 el comportamiento de los valores de concentraciones de SO_2 . Se observa una mayor concentración en el receptor ubicado en la ZEDM, donde se aprecian 6 eventos en los que los valores fueron superiores a la NC 1020:2014, observándose un valor máximo admisible horario superior $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Mientras que, en el CP Mariel solo se reporta un pico superior a lo normado.

Para el NO_x se evidenció un comportamiento similar al del SO_2 , donde la mayoría de los valores máximos horarios se observan en la ZEDM. Por tanto, las mayores afectaciones de NO_x se localizan en la ZEDM que aporta los 6 picos de incumplimiento de la norma. En el resto de los receptores no es superada la concentración máxima admisible como se aprecia en la Figura 8.

El comportamiento del PM_{10} en la Figura 9, arroja que la mayoría de los valores superiores a la norma se encuentran sobre el CP Mariel produciendo un impacto significativo sobre la salud de las personas que habitan el mayor núcleo urbano de la bahía. Se puede apreciar que sobre la ZEDM también es reportado un pico de concentración de PM_{10} .

Validación de CALPUFF

El comportamiento de los valores de inmisión horaria de PM_{10} , calculados por CALPUFF y los obtenidos en las mediciones arrojaron una pobre correlación. Los valores simulados con el modelo CALPUFF sobreestimó las concentraciones de PM_{10} al realizar diferentes corridas considerando incluso otros valores de emisiones estimados más adecuados, como se muestra en la Figura 10.

Los errores obtenidos son producidos por varios factores, en primer lugar, la incapacidad de obtener mediciones de variables meteorológicas in situ por una estación meteorológica ubicada en el dominio que serviría para refinar el comportamiento de las variables meteorológicas en el modelo de diagnóstico CALMET. Es decir, hubiese sido necesario validar CALMET antes de proceder a trabajar con CALPUFF.

En Cuba la gran mayoría de los estudios de tratamiento de calidad del aire emplean para conocer el comportamiento de la emisión, valores de concentraciones procedentes de las industrias, basadas en parámetros de sus procesos industriales. Estas tasas de emisión son calculadas a partir de coeficientes propios de las maquinarias empleadas y la información brinda-

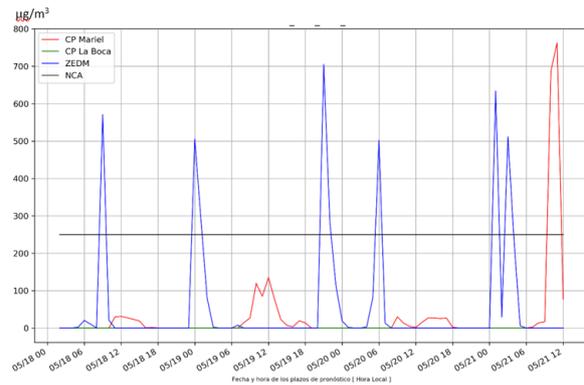


Figura 7. Comportamiento de los receptores discretos para el SO_2

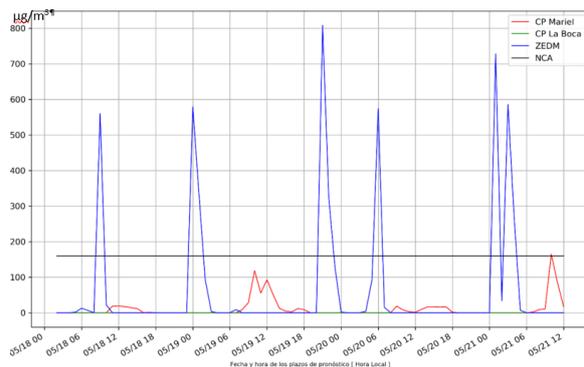


Figura 8. Comportamiento de los receptores discretos para el NO_x

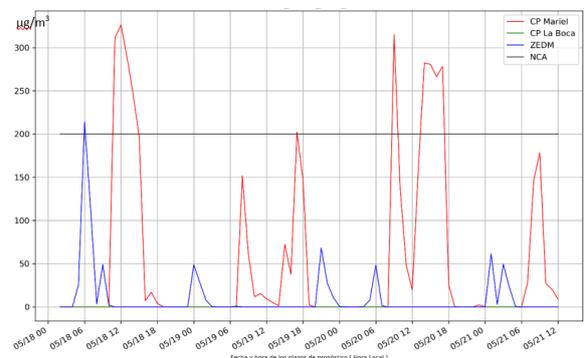


Figura 9. Comportamiento de los receptores discretos para el PM_{10}

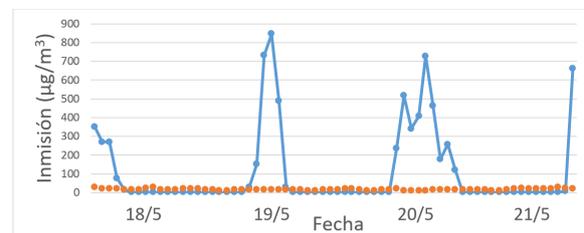


Figura 10. Comportamiento de las concentraciones calculadas por CALPUFF (○) y las medidas (●) para el periodo de estudio.

da por su fabricante, sin embargo, en la realidad las industrias podrían emitir valores diferentes. Por tanto, estas dos consideraciones son las más importantes a la hora de analizar el comportamiento de los resultados. Además, una evaluación del modelo en un plazo de

tiempo mayor, en precedencia de más mediciones también pudiese mejorar los resultados.

Respecto a ambos estadígrafos (BIAS y NMSE) los resultados no son los esperados por las razones antes mencionadas y se aprecia muy poca relación entre lo calculado por CALPUFF y la medición. En ambas se obtienen resultados muy alejados de los criterios de aceptación. Estos malos resultados estadísticos no comprometen la utilidad de la investigación, ni su calidad. Mejores resultados pudiesen ser obtenidos a partir de contar con más datos al inicio del estudio. Sin embargo, en futuras investigaciones al contarse con estos resultados mejores podrían esperarse.

Tabla 2. Cálculo de estadígrafos para PM₁₀

Estadígrafo	BIAS (µg/m ³)	NMSE (µg/m ³)
CALPUFF	92,36	1 950,20

CONCLUSIONES

La débil influencia anticiclónica, la presencia de la brisa de mar y el terreal, así como la altura de la capa de mezcla determinaron el comportamiento de los penachos de CO, SO₂, NO_x y PM₁₀ en el área de estudio.

Se determina la distribución espacial de los contaminantes atmosféricos con el uso del modelo CALMET/CALPUFF emitidos por las principales industrias. Las máximas concentraciones horarias de PM₁₀ se localizaron sobre el CP Mariel en horarios del día influenciados por la brisa de mar, mientras que las más elevadas de SO₂ y NO_x ocurrieron sobre la ZEDM en la noche y la madrugada favorecidas por la brisa de tierra.

Se aprecia una sobrestimación de la concentración del PM₁₀ simulado con el modelo CALPUFF y bajos valores de correlaciones entre estos y las mediciones realizadas en el área de estudio debido a la ausencia de mediciones meteorológicas y al uso de datos de emisión basados en procesos industriales.

REFERENCIAS

Carson, D. J. (1973). The development of a dry inversion-capped convectively unstable boundary layer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 99(421), 450-467. <https://doi.org/10.1002/qj.49709942105>.

Dresser, A. L., & Huizer, R. D. (2011). CALPUFF and AERMOD model validation study in the near field: Martins Creek revisited. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 61(6), 647-659. <https://doi.org/10.3155/1047-3289.61.6.647>

González, J. A., Hernández, A., Rodríguez, A., Saavedra, S., & Casares, J. J. (2015). Surface and upper-air WRF-CALMET simulations assessment over a coastal and complex terrain area.

International Journal of Environment and Pollution, 57(3-4), 249-260. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2015.074509>.

Hernández, A., Jáuregui-Haza, U., González, J. A., Casares-Long, J. J., Saavedra-Vázquez, S., Guzmán-Martínez, F., & Torres-Valle, A. (2016). Aplicaciones del modelo lagrangiano de dispersión atmosférica CALPUFF. *Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 17(1), 32-44.

Hernández, A., Reinoso, M., & Hernández, F. (2017). Contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros avileños. *Universidad & Ciencia*, 6(2), 17-26.

Hernández, A., Saavedra, S., Rodríguez, A., Souto, J. A., & Casares, J. J. (2014). Coupling WRF and CALMET models: Validation during primary pollutants glc episodes in an Atlantic coastal region. *Air Pollution Modeling and its Application*, XXII, 681-684. https://doi.org/10.1007/978-94-007-5577-2_116

Hernández, A., Souto, J. A., Rodríguez, A., Saavedra, S., & Casares, J. J. (2015). Validation of CALMET/CALPUFF models simulations around a large power plant stack. *Física de la Tierra*, 27, 35-55.

Holzworth, G. C. (1964). Estimates of mean maximum mixing depths in the contiguous United States. *Monthly Weather Review*, 92(5), 235-242. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1964\)092<0235:EOMMMD>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1964)092<0235:EOMMMD>2.3.CO;2).

Holzworth, G. C. (1967). Mixing depths, wind speeds and air pollution potential for selected locations in the United States1. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 6, 1039-1044. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1967\)006<1039:MDWSAA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1967)006<1039:MDWSAA>2.0.CO;2).

Huang, D., & Guo, H. (2019). Dispersion modeling of odour, gases, and respirable dust using AERMOD for poultry and dairy barns in the Canadian Prairies. *Science of The Total Environment*, 690, 620-628. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.07.010>.

INSMET. (2015). *Caracterización climática de la zona del montaje de la torre de 180 metros de la Central Eléctrica Máximo Gómez del Mariel. Periodo 2005-2014* (p. 17) [Informe Técnico del Centro Meteorológico Provincial La Habana-Artemisa-Mayabeque].

Levy, J. I., Spengler, J. D., Hlinka, D., Sullivan, D., & Moon, D. (2002). Using CALPUFF to evaluate the impacts of power plant emissions in Illinois: Model sensitivity and implications. *Atmospheric Environment*, 36(6), 1063-1075. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00493-9](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00493-9).

López, C. M. (2006). *Introducción a la Gestión de la Calidad del Aire*. Instituto de Meteorología.

Maul, P. R. (1980). *Atmospheric transport of sulphur compound pollutants* [Tesis de Doctorado, Imperial Collage of London.]. <https://spiral.imperial.ac.uk/>

- [bitstream/10044/1/35253/2/Maul-PR-1980-PhD-Thesis.pdf](#)
- Murena, F., Mocerino, L., Quaranta, F., & Toscano, D. (2018). Impact on air quality of cruise ship emissions in Naples, Italy. *Atmospheric Environment*, 187, 70-83. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2018.05.056>
- Oyazún, M. (2010). Air pollution and its effects on health. *Revista chilena de enfermedades respiratorias*, 26, 16-25. <https://doi.org/10.4067/S0717-73482010000100004>.
- Prieto, F., Benítez, I., Ramos, L. B., & García, A. (2017). Determinación de las emisiones de dióxido de azufre en la termoeléctrica “10 de octubre”. *Monteverdia*, 10(1), 26-35.
- Radonjic, Z., Chambers, D., Telenta, B., & Janjic, Z. (2011). Coupled NMM-CALMET meteorology development for the CALPUFF air dispersion modelling in complex terrain and shoreline settings. *Geophysical Research Abstracts*, 13(EGU2011), 3729.
- Rood, A. S. (2014). Performance evaluation of AERMOD, CALPUFF, and legacy air dispersion models using the Winter Validation Tracer Study dataset. *Atmospheric Environment*, 89, 707-720. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2014.02.054>.
- Scire, J. S., Robe, F. R., Fernau, M. E., & Yamartino, R. J. (2000). *A user's guide for the CALMET Meteorological Model* (p. 332) [Tech. Rep.]. Earth Tech, Inc. http://www.src.com/CALPUFF/download/CALMET_UsersGuide.pdf
- Scire, J. S., Strimaitis, D. G., & Yamartino, R. J. (2000). *A user's guide for the CALPUFF dispersion model* (p. 521) [Tech. Rep.]. Earth Tech, Inc. http://www.src.com/calpuff/download/CALPUFF_UsersGuide.pdf
- Sierra-Lorenzo, M., Borrajero-Montejo, I., Ferrer-Hernández, A., Hernández-Valdés, Y., Morfa, J., Morejón-Loyola, Y., & Hinojosa-Fernández, M. (2017). *Estudios de Sensibilidad del Sispi a Cambios de la pbl, la Cantidad de Niveles Verticales y, las Parametrizaciones de Microfísica y Cúmulos, a muy alta Resolución* (Informe de Resultado Científico No. 1; Proyecto: Sistema de Predicción a muy corto plazo basado en el Acoplamiento de Modelos de Alta Resolución y Asimilación de Datos II, p. 26). Instituto de Meteorología.
- Sosa, C. (2018). Gestión de la contaminación del aire en un municipio Industrial. Caso de estudio: Mariel. *Revista Cubana de Meteorología*, 24(1), 75-94.
- Souto, J. A., Moral, C., Rodríguez, A., Saavedra, S., Casares, J. J., & Hernández-Garces, A. (2014). Simulation of plume dispersion using different stack configurations and meteorological inputs. *International Journal of Environment and Pollution*, 55(1-4), 139-147. <https://doi.org/10.1504/IJEP.2014.065917>.
- Turtos, L., Capote, G., Fonseca, Y., Alvarez, L., Gacita, M., Bezanilla, A., Borrajero, I., Meneses, E., & Pire, S. (2013). Assessment of the Weather Research and Forecasting model implementation in Cuba addressed to diagnostic air quality modeling. *Atmospheric Pollution Research*, 4(1), 64-74. <https://doi.org/10.5094/APR.2013.007>
- Souto, J. A.; Moral, C.; Rodríguez, A.; Saavedra, S.; Casares, J. J. & Hernández-Garces, A. 2014. “Simulation of plume dispersion using different stack configurations and meteorological inputs”. *International Journal of Environment and Pollution*, 55(1): 139-147, DOI: [10.1504/IJEP.2014.065917](https://doi.org/10.1504/IJEP.2014.065917).

NOTA

¹ <http://nomads.ncdc.noaa.gov/>

Conflicto de intereses: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses

Contribución de autores: **Conceptualización:** Anel Hernández Garces y Adrian Luis Ferrer Hernández.

Redacción-revisión y edición: Roger David Ramírez Plasencia, Anel Hernández Garces y Adrian Luis Ferrer Hernández. **Investigación:** Roger David Ramírez Plasencia. **Metodología:** Roger David Ramírez Plasencia, Anel Hernández Garces y Adrian Luis Ferrer Hernández. **Conservación de datos:** Adrian Luis Ferrer Hernández.

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/)