

Caso de estudio en la Bahía de La Habana mediante un acoplamiento WRF/CALMET

Case study in Havana bay using a coupling WRF/CALMET



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

 MCs. Roy Peña Cossío^{1*},  Dr. Anel Hernández Garcés²,  Lic. Adrian Luis Ferrer Hernández³

¹Centro de Investigación y Manejo Ambiental del Transporte (Cimab).

²Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE)

³Sociedad Meteorológica de Cuba, La Habana 10400, Cuba

RESUMEN: Se evaluó el modelo meteorológico CALMET durante el año 2016 en un dominio costero, la Bahía de La Habana, donde se aplicaron diversas resoluciones y varios conjuntos de datos de entrada CALMET diferentes. La evaluación se centró en términos de rendimiento del modelo en cuanto a viento y temperatura en superficie. Como datos de entrada, se combinaron los resultados del modelo de pronóstico WRF con medidas meteorológicas de la estación de Casablanca. El modelo CALMET mejoró sensiblemente los resultados de velocidad y dirección de viento en superficie del modelo WRF. Los estadísticos de temperatura del aire en superficie mostraron mejores resultados, pues estos se derivan de interpolaciones espaciales de los datos de entrada empleados. También se observó una mejora significativa en la predicción de la velocidad de viento a medida que se incluye la información de más estaciones meteorológicas como datos de entrada.

Palabras claves: modelo meteorológico, CALMET, WRF.

ABSTRACT: CALMET meteorological model was evaluated during 2016 in a coastal domain in the Havana Bay. Several resolutions and different CALMET input data sets were used. The evaluation was focused in terms of model performance of wind and surface temperature issues. As input data, the WRF model results and meteorological measurements of Casablanca station were combined. WRF model surface speed and direction results have been significantly improved by CALMET model. Surface temperature statistics showed better results, since these are derived from spatial interpolations of the input data used. Significant improvement was also observed in wind speed and temperature for statistical values, when more stations as input data were provided

Key words: meteorological model, CALMET, WRF.

INTRODUCCIÓN

Con el creciente desarrollo industrial de la humanidad, la emisión y dispersión de contaminantes afecta de una manera u otra a las diferentes capas de la atmósfera, repercutiendo de manera negativa sobre el clima, la salud y los ecosistemas, por lo que la calidad y protección del aire son una prioridad en la política ambiental (Huang *et al.*, 2018). Los modelos de dispersión atmosférica son una de las soluciones más extendidas al problema del comportamiento de los contaminantes en la atmósfera, estos permiten evaluar estrategias de control de emisiones, seleccionar localizaciones de futuros focos emisores, con el fin de minimizar el impacto sobre el entorno y de garantizar que

la inmisión permanezca por debajo de los umbrales legales recomendados (Zapata *et al.*, 2018). Para lograr resultados realistas de los modelos de dispersión se requiere información meteorológica precisa, tanto a nivel del suelo como en altura (Hernández-Garcés *et al.*, 2017a).

CALMET (Scire *et al.*, 2000) es un modelo meteorológico que incluye un módulo de diagnóstico de campos de viento, que realiza un análisis objetivo y parametrizado de flujos en pendiente, efectos cinemáticos del terreno y efectos de bloqueo del terreno mediante un procedimiento de minimización por divergencia; e incluye un módulo micrometeorológico de capa límite. Este modelo se utiliza con fines regulatorios.

*Autor para correspondencia: Roy Peña Cossío. E-mail: roy@cimab.transnet.cu

Recibido: 05/12/2020

Aceptado: 12/03/2021

El módulo de diagnóstico se ejecuta en dos etapas. En el primer paso, un campo de vientos inicial se ajusta por los efectos cinemáticos del terreno, los flujos en pendiente, y efectos de bloqueo del terreno. El segundo paso consiste en un procedimiento de análisis objetivo que introduce las mediciones en el campo de vientos obtenido en el primer paso, para así obtener un campo de vientos final (González *et al.*, 2015). El campo de vientos inicial se puede obtener por varias vías: interpolando los vientos de las estaciones de medición en superficie para los valores de la capa inferior, y los de radiosondeos para los valores en altura; o por la combinación de una extrapolación de ambos métodos de medición. En este último caso es posible brindarle diferente importancia relativa a las mediciones en superficie según la altura de la capa. Otras alternativas son: utilizar campos de viento de modelos de predicción meteorológica, o definirlos constantes en todo el dominio (Hernández-Garcés *et al.*, 2017b).

CALMET tiene una opción que permite la asimilación de campos de viento generados por los modelos de pronóstico como WRF (Skamarock y Klemp, 2008). Esta opción permite que CALMET se ejecute con una mayor resolución que la usada en el modelo de pronóstico, además de contemplar la influencia de fenómenos locales sobre el viento, tales como la circulación de brisas marinas o la topografía compleja que no siempre pueden ser medidas en las estaciones de superficie (Hernández-Garcés *et al.*, 2017b).

En los últimos años CALMET ha encontrado gran aplicabilidad. Contini *et al.*, 2016, emplearon un acoplamiento WRF-Chem/CALMET/CMAQ-L para estudiar la influencia del clima en la meteorología y la calidad del aire urbana aprovechando la velocidad de cálculo de CALMET. Luego, Fallah-Shorshani *et al.*, 2017, utilizaron un acoplamiento MM5/CALMET para estudiar la dispersión de NO_x en la ciudad de Montreal, Canadá. Mientras, Giaiotti *et al.*, 2018, alimentaron CALMET con datos de estaciones en superficie y en altura para estudiar las deposiciones simuladas por CALPUFF de Cs¹³⁷ producidas por el accidente de Chernóbil. Más tarde, Huang *et al.*, 2019, utilizaron un acoplamiento WRF/CALMET para evaluar la capacidad del modelo de simular el paso del tifón Meranti en 2016. Recientemente, Zapata *et al.*, 2020, acopló el modelo NAM (North American Mesoscale Model) a CALMET para alimentar el modelo CALPUFF y así estudiar la dispersión de SO₂ proveniente de instalaciones petroleras en Villahermosa, Tabasco, México.

Con el objetivo de encontrar la mejor configuración del modelo de diagnóstico meteorológico CALMET, para alimentar posteriormente el modelo de dispersión CALPUFF en el entorno elegido, en este trabajo se acopla CALMET con el modelo WRF sobre un dominio de 10 x 10 km², en la Bahía de La Habana durante un año.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio y períodos de evaluación

En el estudio se utilizó el modelo meteorológico CALMET con el objetivo de proporcionar datos meteorológicos de entrada al modelo de dispersión atmosférica CALPUFF, en el entorno de la Bahía de La Habana. Con este fin se desarrollaron dos simulaciones meteorológicas a lo largo de un período de un año. Este período abarca todo el año 2016, comenzando a las 00:00 UTC del primer día al 31 de diciembre del mismo año a las 23:59 UTC.

Para este modelo, se empleó una resolución horizontal de 0,2 x 0,2 km² sobre el dominio de 10 x 10 km², (Figura 2). Se aplicó una resolución de 10 capas verticales de altura sobre el suelo de: 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1200, 2000, 3000 y 4000 m a todas las simulaciones de CALMET. Se aplicó, además, el módulo de diagnóstico de viento; para el resto de las opciones se aplicaron las predeterminadas (Fox, 2009).

En esta aplicación el modelo CALMET se alimentó con los resultados del modelo meteorológico WRF sobre un área de 549 x 1233 km² abarcando la isla de Cuba (Figura 1). La resolución horizontal del dominio interior es de 3 km.

El modelo meteorológico de mesoescala WRF posee diversas opciones de modelización de la física y la dinámica atmosférica, cuya elección depende de la experiencia previa en el uso de esquemas más probados (generalmente, de uso operacional) frente a otros más novedosos; y del coste computacional de cada una de las opciones elegidas.

Se eligieron las opciones que resultarían más adecuadas con el objetivo de suministrar datos meteorológicos de entrada para la simulación de la calidad del aire, para lo que se consideró la singularidad del entorno caribeño de estudio. Así, se eligieron opciones equivalentes previamente probadas sobre Cuba con este modelo (Turtós *et al.*, 2013).

Validación meteorológica

En el dominio de simulación se disponía de una estación meteorológica en superficie capaz de suministrar datos de los parámetros meteorológicos estándar. Como datos de entrada al modelo CALMET, a los resultados de la simulación con el modelo WRF se añadieron finalmente mediciones meteorológicas en superficie debido a la capacidad de éstas de mejorar los resultados del modelo CALMET en superficie.

Se establecieron así dos configuraciones diferentes como datos de entrada al modelo CALMET (Tabla 1). En la primera, donde los datos de la estación no fueron utilizados como entrada a CALMET, se utilizaron para la validación de la simulación del modelo.

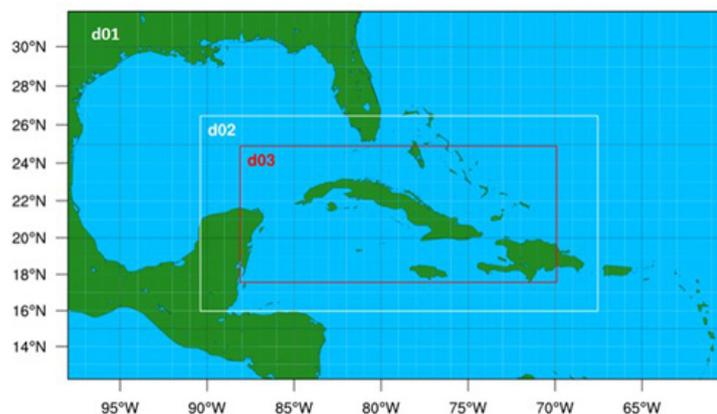


Figura 1. Dominios anidados aplicados en la simulación WRF, el dominio interior proporciona la entrada meteorológica al modelo CALMET (resolución: d01: 27x27 km²; d02: 9x9 km²; d03: 3x3 km²).

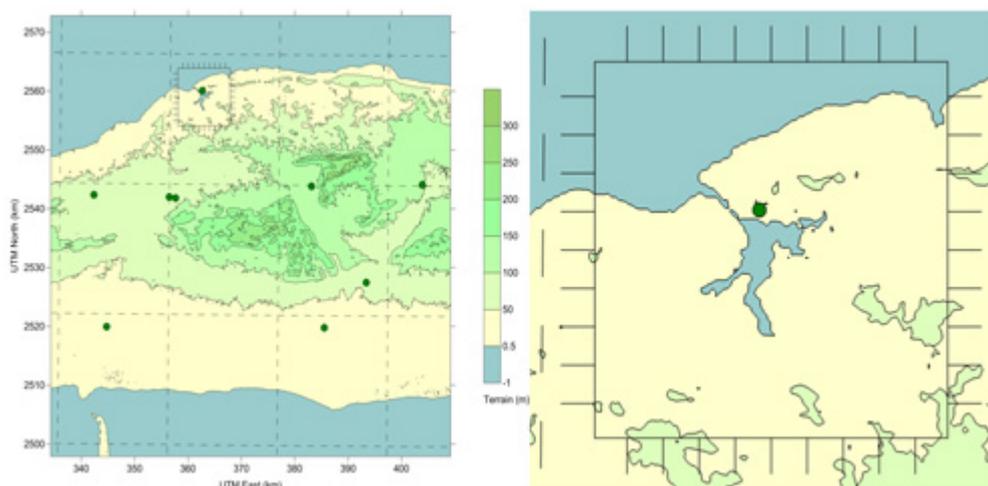


Figura 2. a) Ubicación del dominio de simulación del modelo CALMET en el entorno de La Habana. b) Detalle del dominio de simulación en el que se muestra la estación meteorológica utilizada en el estudio (●).

Tabla 1. Simulaciones del modelo CALMET realizadas con diferentes datos de entrada.

Simulación CALMET	Datos de entrada para CALMET	Estación meteorológica para datos de entrada	Estación meteorológica para validación
Met_1(w)	Resultados WRF	-	Casablanca
Met_2(w+s)	Resultados WRF y una estación meteorológica	Casablanca	-

Para la validación de cada simulación con el modelo CALMET se emplearon los estadísticos descritos en la *Tabla 2* (Jiménez *et al.*, 2006) y se incluyeron los resultados de WRF. El mejor valor de ajuste de las simulaciones se obtendría para valores de cero en estos parámetros. Para velocidad de viento y temperatura se consideran buenos los valores inferiores a 1,5 y se consideran aceptables valores inferiores a tres. Mientras para dirección de viento se aceptan valores hasta 30.

Tabla 2. Definición de los parámetros estadísticos utilizados para la evaluación del modelo meteorológico.

Parámetro	Definición
$MB = \frac{1}{N} \sum_1^N (M - O)$	Bias medio
$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (M - O)^2}$	Raíz del error cuadrático medio

Donde:
N es el número de observaciones
M es el resultado del modelo, y
O es la medición

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dado que el dominio presenta alguna complejidad topográfica las alteraciones del flujo se deben fundamentalmente a la influencia de la topografía y a la influencia marina de la línea de costa (Figura 3).

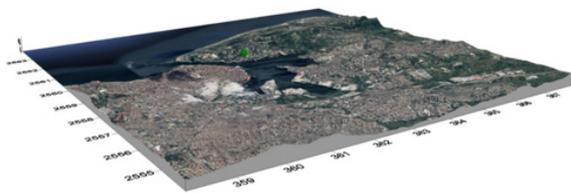


Figura 3. Dominio de simulación 3D en el que se muestran los principales accidentes geográficos y la estación meteorológica (●).

En relación con los resultados de velocidad de viento, la velocidad media durante el período de simulación fue baja ($2,12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), favoreciendo la inmisión y con vientos máximos de hasta $57,86 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, lo que favorece la autodepuración de la atmósfera.

En relación con los resultados de velocidad de viento (Tabla 3), los parámetros estadísticos presentan valores elevados, aunque lógicamente los estadísticos disminuyen a medida que se incluye una estación meteorológica como dato de entrada al modelo CALMET. Obviamente, en este último caso los valores de los estadígrafos dan cero debido a que se fuerza al modelo a emplear estos datos y en consecuencia los reproduce. Se incluye este resultado en la tabla para confirmar que se está realizando de forma correcta la validación meteorológica. Hay que destacar que CALMET alimentado solo con WRF no logra mejorar los resultados de WRF en superficie para velocidad de viento. Ambos resultados son malos. Se debe aclarar que los datos de WRF empleados se obtienen cada seis horas y CALMET es forzado a interpolar temporalmente las cinco horas restantes. Indiscutiblemente, al comparar las simulaciones en horas interpoladas con los valores de las estaciones en superficie se introducen grandes errores. No obstante, a CALPUFF se le introducirían los datos de la última simulación que incluyen datos de la estación de Casablanca lo que debe mejorar sensiblemente los resultados para

velocidad de viento. Este hecho no se puede verificar pues no se cuenta con otra estación meteorológica en el dominio de simulación.

En relación con los resultados de dirección de viento (Tabla 4), MB para WRF reporta un buen ajuste. Sin embargo RMSE reporta valores elevados. De igual manera CALMET alimentado solo con WRF no logra mejorar los resultados de WRF en superficie para dirección de viento. Este parámetro se ve afectado por los mismos factores que la velocidad de viento.

En el caso de la simulación Met_2 (w+s) donde se incluyen datos de estaciones meteorológicas de superficie como dato de entrada a CALMET mejora sensiblemente el RMSE pero se obtienen valores elevados para el MB. Deberían ser cero en este caso al esperarse que esta simulación reprodujera a la salida exactamente los datos de entrada. Pero se pudo comprobar que cuando hay calma (velocidad de viento igual a $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) y en la estación se considera dirección de viento igual a 0° el modelo CALMET no reproduce este valor y en su defecto computa un valor diferente de cero y como consecuencia los parámetros estadísticos empleados difieren de cero.

Los estadísticos de temperatura del aire en superficie (Tabla 5) muestran mejores resultados. Esto se debe a que los resultados de viento del modelo CALMET no están solamente basados en sus datos de entrada, sino también en las restricciones físicas aplicadas; sin embargo, los resultados de temperatura del modelo CALMET se derivan de interpolaciones espaciales de los datos de entrada empleados. En este caso, CALMET mejora los resultados de WRF al disminuir la resolución. Incluso aunque en la simulación Met_1 (w) las medidas de la estación de Casablanca no se emplean como datos de entrada al modelo, se obtienen buenos resultados lo que indica que la distribución de temperatura en el dominio es bastante homogénea. No pudo apreciarse una mejoría al introducirle a CALMET los datos de la estación de Casablanca. En la simulación Met_2 (w+s) se esperaban valores de cero. Esta diferencia, aunque pequeña, puede deberse a que el modelo CALMET da valores de temperatura con dos cifras decimales y la estación de Casablanca que depende de un instrumento reporta con una sola cifra decimal.

Tabla 3. Resultados de los estadígrafos de velocidad de viento superficial horaria (m s^{-1}) para las diferentes simulaciones realizadas.

Simulación CALMET	MB	RMSE
WRF	-7,4	11,2
Met_1(w)	-12,4	15,2
Met_2(w+s)	0,0	0,0

Tabla 4. Resultados de los estadísticos de dirección de viento superficial horaria ($^\circ$) para las diferentes simulaciones realizadas.

Simulación CALMET	MB	RMSE
WRF	1,1	46,1
Met_1(w)	-4,4	48,9
Met_2(w+s)	4,1	22,8

Tabla 5. Resultados de los estadísticos de temperatura superficial horaria (°C) para las diferentes simulaciones realizadas.

Simulación CALMET	MB	RMSE
WRF	1,0	3,9
Met_1(w)	-0,2	1,6
Met_2(w+s)	-0,2	1,6

En la **Figura 4** se muestra la comparación de la precipitación acumulada en la estación de Casablanca, medida y simulada (mm). Se puede apreciar que WRF de forma alterna reproduce valores simulados, los subestima o los sobreestima. CALMET por su parte supera tanto a WRF como a los valores medidos en la estación. No se obtuvieron diferencias entre las dos simulaciones CALMET. Hay que destacar que para la estación Casablanca y las simulaciones CALMET se calcula la lluvia acumulada cada tres horas, mientras que para WRF se hace cada seis horas debido a las características de los datos disponibles en esta investigación.

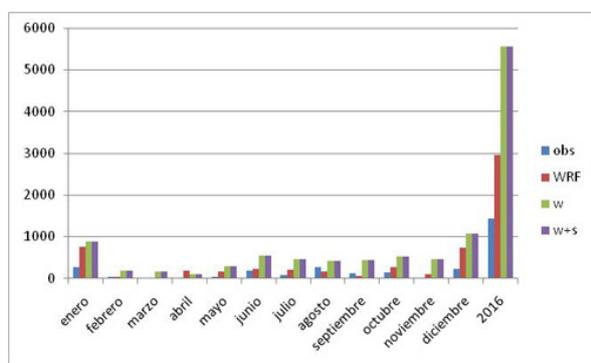


Figura 4. Precipitación acumulada en la estación de Casablanca, medida y simulada (mm).

La altura de capa de mezcla es un parámetro muy importante para explicar los cambios en la inmisión en condiciones meteorológicas y de emisión similares ya que determina el volumen de aire en que se van a dispersar los contaminantes. Debido a esto se compararon los resultados de la misma obtenidos de las simulaciones realizadas. A modo de ejemplo se muestran los resultados del mes de enero (**Figura 5**). En este caso no se pudo comparar con mediciones reales debido a que estas se obtienen con radiosondas y la estación de Casablanca no cuenta con este servicio.

Se puede apreciar en la **Figura 5** que la con simulación Met_1 (w) se obtienen valores máximos diarios inferiores a los de WRF. Sin embargo WRF produce valores mínimos diarios inferiores a CALMET debido a que CALMET se restringe este parámetro a un valor realista de 50 m. Por su parte, WRF con frecuencia reporta valores mínimos diarios de cero. Por otro lado, la configuración Met_2 (w+s) donde se incorporan datos de Casablanca a la simulación produce valores superiores durante toda la simulación. En muchos casos duplica a la simulación Met_1 (w). Resultados similares se obtienen el resto de los meses del año (Anexo 1).

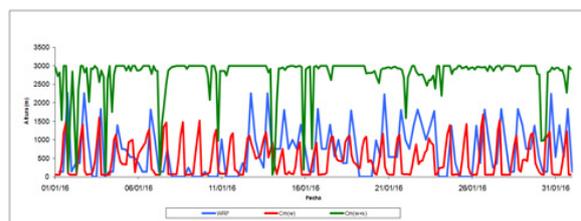


Figura 5. Alturas de capa de mezcla simuladas (m) durante el mes de enero de 2016.

CONCLUSIONES

El modelo CALMET fue probado en una región costera del Caribe, sobre un dominio de 10 x 10 km², en la Bahía de La Habana, la capital de Cuba, acoplado a una simulación de WRF, con el fin de comprobar su capacidad para representar los patrones de viento y de temperatura a lo largo de un año y para encontrar la mejor configuración del modelo que alimente el modelo de dispersión CALPUFF en el entorno elegido. Se aplicaron además, diversas resoluciones y diferentes conjuntos de medidas en superficie de forma conjunta con los resultados de WRF como datos de entrada a CALMET.

El modelo CALMET, alimentado solo con WRF, no mejora los resultados de velocidad de viento en superficie del modelo WRF, estos resultados mejoraron notablemente cuando se introdujeron valores de entrada a CALMET de la estación meteorológica. Siendo esta última la mejor configuración del modelo encontrada.

En relación con los resultados de dirección de viento, CALMET alimentado solo con WRF no logra mejorar los resultados de WRF en superficie para dirección de viento. Este parámetro se ve afectado por los mismos factores que la velocidad de viento.

Los estadísticos de temperatura en superficie muestran mejores resultados. Esto se debe a que los resultados de viento del modelo CALMET no están solamente basados en sus datos de entrada, sino también en las restricciones físicas aplicadas; sin embargo, los resultados de temperatura del modelo CALMET se derivan de interpolaciones espaciales de los datos de entrada empleados

Con respecto a la precipitación acumulada en la estación de Casablanca, durante el período de estudio, se puede apreciar que WRF de forma alterna reproduce valores simulados, los subestima o los sobreestima. CALMET por su parte supera tanto a WRF como a los valores medidos en la estación. No se obtuvieron diferencias entre las dos simulaciones CALMET para las precipitaciones.

REFERENCIAS

- Contini, D.; Cesari, D.; Conte, M. & Donato, A. 2016. "Application of PMF and CMB receptor models for the evaluation of the contribution of a large coal-fired power plant to PM₁₀ concentrations". *Science of The Total Environment*, (560-561): 131-140.
DOI: [10.1016/j.scitotenv.2016.04.031](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.031).
- Fallah-Shorshani, M.; Maryam Shekarrizfard, M. & Marianne Hatzopoulou, M. 2017. "Evaluation of Regional and Local Atmospheric Dispersion Models for the Analysis of Traffic-Related Air Pollution in Urban Areas". *Atmospheric Environment*, 167: 270-282.
DOI: [10.1016/j.atmosenv.2017.08.025](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.025)
- Fox, T. 2009. "Memorandum: Clarification on the EPA-FLM Recommended Settings for CALMET". *Lakes Environmental*. Available: <[https://www.epa.gov/files/pdf/Memorandum: Clarification on the EPA-FLM Recommended Settings for CALMET.pdf](https://www.epa.gov/files/pdf/Memorandum_Clarification_on_the_EPA-FLM_Recommended_Settings_for_CALMET.pdf)> [Consulted: December 09/ 2019]
- Giaiotti, D.; Oshurok, D. & Skrynyk, O. 2018. "The Chernobyl nuclear accident 137Cs cumulative depositions simulated by means of the CALMET/CALPUFF modelling system". *Atmospheric Pollution Research*, 9(3): 502-512.
DOI: [10.1016/j.apr.2017.11.007](https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.11.007).
- 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,
DOI: [10.1504/IJEP.2015.074509](https://doi.org/10.1504/IJEP.2015.074509).
- Hernández-Garcés, A.; González, J. A.; Casares, J.; Turtos, L.; Álvarez, L. & Jauregui-Haza, U. 2017a. "Case Study in Jagua Bay at South of Cuba Using a Coupling WRF/CALMET". *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(4): 659-667. ISSN: 0102-7786.
DOI: [10.1590/0102-7786324013](https://doi.org/10.1590/0102-7786324013).
- Hernández-Garcés, A.; Jáuregui-Haza, U.; González, J.A.; Casares, J.J. & Álvarez, L. 2017b. "Aplicaciones del modelo de diagnóstico meteorológico CALMET". *Revista Cubana de Meteorología*, 23(1): 122-140. ISSN: 0864-151X.
- Huang, J.; Pan, X.; Guo, X. & Li, G. 2018. "Impacts of air pollution wave on years of life lost: A crucial way to communicate the health risks of air pollution to the public". *Environment international*, 113:42-49.
DOI: [10.1016/j.envint.2018.01.022](https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.01.022).
- Huang, S.; Tang, S.; Yu, H.; Xue, W.; Fang, P. & Chen, P. 2019. "Impact of physical representations in CALMET on the simulated wind field over land during Super Typhoon Meranti". *Frontiers of Earth Science*, 13 (4): 744-757.
DOI: [10.1007/s11707-019-0769-5](https://doi.org/10.1007/s11707-019-0769-5).
- Jiménez, P.; Jorba, O.; Parra, R. & Baldasano, J.M. 2006. "Evaluation of MM5-EMICAT2000-CMAQ performance and sensitivity in complex terrain: high-resolution application to the northeastern Iberian Peninsula". *Atmospheric Environment*, 40(26):5056-72.
DOI: [10.1016/j.atmosenv.2005.12.060](https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.12.060).
- Scire, J.S.; Robe, F.R.; Fernau, M.E. & Yamartino, R.J. 2000. A User's Guide for the CALMET Meteorological Model (Version 5), Earth Tech, Concord, MA. <[https://www.src.com/download. A User's Guide for the CALMET Meteorological Model \(Version 5\).pdf](https://www.src.com/download/A_User's_Guide_for_the_CALMET_Meteorological_Model_(Version_5).pdf)> [Consulted: December 10/ 2019]
- Skamarock, W.C. & Klemp, J.B. 2008. "A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications". *Journal of Computational Physics*, 27(7): 3465-3485.
DOI: [10.1016/j.jcp.2007.01.037](https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.01.037).
- Turtos, L.; Capote, G.; Fonseca, Y.; Álvarez, L.; Sánchez, 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.
DOI: [10.5094/APR.2013.007](https://doi.org/10.5094/APR.2013.007).
- Zapata, C. B.; Yang, C.; Yeh, S.; Ogden, J. & Kleman, M. J. 2018. "Estimating criteria pollutant emissions using the California Regional Multisector Air Quality Emissions (CA-REMARQUE) model v1.0". *Geosci. Model Dev.*, 11: 1293-1320, ISSN: 1991-9603,
DOI: [10.5194/gmd-11-1293-2018](https://doi.org/10.5194/gmd-11-1293-2018).
- Zapata, C.M.; Valdes, A.; Bautista, R. & Meraz, E.A.. 2020. "Comparison between simulated SO₂ concentrations using satellite emission data and Pemex emission inventories in Tabasco, Mexico". *Environmental Monitoring and Assessment* 192(310): 1-12.
DOI: [10.1007/s10661-020-8247-9](https://doi.org/10.1007/s10661-020-8247-9).

MCs. *Roy Peña Cossío*. Investigador agregado. Centro de Investigación y Manejo Ambiental del Transporte (Cimab). E-mail: roy@cimab.transnet.cu, roypcossio@gmail.com.

Dr. *Anel Hernández Garces*, Profesor Auxiliar. Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría (CUJAE). E-mail: anel@quimica.cujae.edu.cu

Lic. *Adrian Luis Ferrer Hernández*, Especialista. Sociedad Meteorológica de Cuba, La Habana 10400, Cuba. E-mail: aluisifh@gmail.com

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

Contribución de los autores: Concepción de la idea: **Roy Peña Cossío, Anel Hernández Garces y Adrian Luis Ferrer Hernández**. Manejo de los datos: **Roy Peña Cossío, Anel Hernández Garces y Adrian Luis Ferrer Hernández**. Análisis de los datos: **Roy Peña Cossío, Anel Hernández Garces y Adrian Luis Ferrer Hernández**. Investigación: **Roy Peña Cossío, Anel Hernández Garces**. Metodología: **Roy Peña Cossío, Anel Hernández Garces**. Software: **Roy Peña Cossío, Anel Hernández Garces y Adrian Luis Ferrer Hernández**. Supervisión: **Roy Peña Cossío, Anel Hernández Garces**. Validación de los resultados: **Roy Peña Cossío, Anel Hernández Garces**

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/)