



Implementación en Cuba del modelo fotoquímico CCATT-BRAMS

Implementation in Cuba of the CCATT-BRAMS photochemical model

José Alejandro Rodríguez-Zas¹✉, Dainet Sierra-Montes de Oca¹, Alina Roig-Rassi¹,

Leonor Turtós-Carbonell²

¹Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía, La Habana, Cuba

²Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, La Habana, Cuba

Resumen

Se realizan corridas del modelo fotoquímico acoplado, meteorología-calidad del aire, CCATT-BRAMS por vez primera en Cuba, con el objetivo de mostrar la factibilidad de su implementación en el país, pues incluye el tratamiento de la quema de biomasa y permite realizar diagnóstico y pronóstico de la calidad del aire. Se emplean dominios anidados de alta resolución (27, 9 y 3 km) y se obtienen las concentraciones de los principales contaminantes criterio y sus distribuciones espaciales sobre el área de estudio, considerando todas las fuentes de emisiones, a partir de dos variantes de bases de datos seleccionadas y una configuración propuesta para las condiciones presentes. A partir de los resultados se verifica el cumplimiento de las normas cubanas de calidad de aire para los gases contaminantes criterios (CO, O₃, NO₂ y SO₂) en el periodo estudiado, a partir de los valores máximos admisibles fijados en las mismas y las metodologías establecidas. Mediante la aplicación de tres estadígrafos, se demuestra la capacidad del modelo de simular, con adecuada precisión, las principales variables meteorológicas importantes para los estudios de contaminación, existiendo buena correspondencia entre los valores modelados y las observaciones de la estación de Casablanca para el periodo analizado.

Palabras clave: contaminación atmosférica, modelos fotoquímicos, CCATT-BRAMS.

Abstract

The photochemical model coupled, meteorology - air quality, CCATT-BRAMS is run for the first time in Cuba, aiming to show the feasibility of its implementation in the country. It includes the treatment of biomass burning and allows diagnosis and forecasting air quality. Nested domains of high resolution (27, 9 and 3 km) are used and the concentrations of the main criteria pollutants and their spatial distributions on the study area are obtained, considering all sources of emissions from two variants of bases selected data and a proposed configuration for the present conditions. Based on the results, compliance with Cuban air quality standards for criteria's gases (CO, O₃, NO₂ and SO₂) was verified in the period studied, based on the maximum admissible values established in

✉ Autor para correspondencia: José Alejandro Rodríguez-Zas. E-mail: jzas@cubaenergia.cu

Recibido: 15/12/2017

Aceptado: 26/3/2018

them and the established methodologies. By applying three statisticians, the model's ability to simulate the main important weather variables for pollution studies with adequate precision is demonstrated and there is good correspondence between the modeled values and the observations of the station Casablanca for the period under review.

Keywords: atmospheric pollution, photochemical models, CCATT-BRAMS

INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica es uno de los problemas más importantes a los que se enfrentan los países del mundo y uno de los retos priorizados a solucionar por la sociedad actual. Se define como la alteración de la composición química media de la atmósfera a niveles de concentración de los contaminantes, que producen efectos medibles e indeseables para la salud humana y otros elementos del medio ambiente, como animales, vegetación, materiales de construcción y ecosistemas, producto de la emisión directa de contaminantes primarios desde fuentes naturales y antropogénicas y contaminantes secundarios formados en la propia atmósfera por la interacción de los primarios ([Seinfeld & Pandis, 2006](#); [Finlayson & Pitts, 1999](#)).

La calidad del aire, afectada por emisiones de sustancias contaminantes de diversa naturaleza, es determinada por la concentración las mismas, lo cual puede obtenerse mediante dos vías fundamentales: mediciones y estimaciones a través de modelos y programas de cálculo. Sin embargo, estos medios por sí solo no son autosuficientes, por lo que existe una tendencia a su complementación e integración. ([Turtós et al., 2006](#))

Hoy en día, el país cuenta con un Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) que brinda información útil sobre la relación entre la cantidad y la composición de combustibles y tecnologías empleadas en Cuba. Este se encuentra desagregado por sectores según establece el Grupo Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), pero no puede utilizarse en estudios detallados de contaminación atmosférica pues no considera la distribución espacial de los

gases de efecto invernadero (GEI) por unidades de Lat/Long. Se puede afirmar, en sentido general, que la información sobre el estado de la calidad del aire en Cuba es incompleta espacial y temporalmente. La disponible no se encuentra normalizada y mucha de la existente pertenece a industrias que la asumen como información confidencial.

En Cuba, se han realizado estudios de dispersión de contaminantes utilizando modelos simplificados como Beryland, SCREEN3 (*SCREENing model*, versión 3), y refinados como ISCST3 (*Industrial Source Complex model for Short Terms*), AERMOD (*AMS/EPA Regulatory MODEL*), CALPUFF con resultados satisfactorios. Sin embargo, estos tipos de modelos no siempre se ajustan a las evaluaciones que se quieren realizar. Por ello, la modelación en Cuba no constituye un instrumento de gestión eficiente aún para la evaluación, control y diagnóstico de la calidad del aire.

Resulta una práctica internacional suplir las carencias en resolución espacial y temporal de las estaciones de monitoreo, mediante el empleo de modelos fotoquímicos de calidad del aire. Así, se implementó en Cuba el CHIMERE (*Chemical- Transport-Model for Institut Pierre-Simon Laplace*), modelo fotoquímico multi-escala diseñado para realizar el pronóstico y diagnóstico de la concentración de Ozono, aerosoles y otros contaminantes y simular escenarios de control de emisiones. Este necesita de WRF (*Weather Research & Forecasting*) para resolver la parte meteorológica, el cual no se retroalimenta con los resultados de CHIMERE. El sistema de modelación WRF-CHIMERE es *off-line* o no acoplado, pues los resultados de la modelación química no se tienen en cuenta en la solución

meteorológica y no considera fuentes importantes como la quema de biomasa o fuentes radiactivas.

La aplicación de un modelo fotoquímico más actual y adecuado para los estudios de química atmosférica en el trópico, posibilitará una mejor comprensión de los procesos físicos y químicos que controlan la polución y prevención de la contaminación y proporcionará una herramienta poderosa para el diagnóstico de la calidad del aire en Cuba. De ahí que se valora la posibilidad de implementar en el país un modelo fotoquímico acoplado, meteorología-calidad del aire, CCATT-BRAMS (*Coupled Chemistry Aerosol and Tracer Transport Model to the Brazilian Developments on the Regional Atmospheric Modeling System*), que representa el estado del arte a nivel internacional e incluye el tratamiento de la quema de biomasa y que permite realizar el pronóstico, o el diagnóstico de la calidad del aire e incluso el pronóstico climático (Freitas *et al.*, 2009).

En el trabajo se muestran los resultados de realizar simulaciones con el modelo fotoquímico acoplado meteorología-calidad del aire CCATT-BRAMS, por primera vez en Cuba. Se realizaron corridas del modelo por vez primera sobre Cuba con dominios anidados de alta resolución, 27-9-3 km, analizándose los principales contaminantes criterio y considerando todas las fuentes de emisiones, a partir de dos variantes de bases de datos seleccionadas y una configuración propuesta para las condiciones presentes. Se emplearon tres estadígrafos para demostrar la capacidad del modelo de simular variables meteorológicas importantes para los estudios de contaminación. Las concentraciones de los principales gases contaminantes criterio (CO, O₃, NO₂ y SO₂) y sus distribuciones espaciales fueron obtenidas con el modelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Dominio de modelación

En el estudio, teniendo en cuenta las capacidades de cómputo, se utilizaron tres dominios anidados (Figura 1): uno externo (D-1) con una resolución de 27 km que abarca todo el territorio nacional y mares adyacentes; un segundo dominio (D-2) con una resolución de 9 km que cubre la región del país en la cual se encuentre la zona de estudio, en este caso la occidental, en la que se coloca el tercer dominio (D-3) con resolución de 3 km, siendo esta vez La Habana, Artemisa y Mayabeque. Se define el período de modelación del 4 al 13 de agosto de 2009, para un total de 10 días.

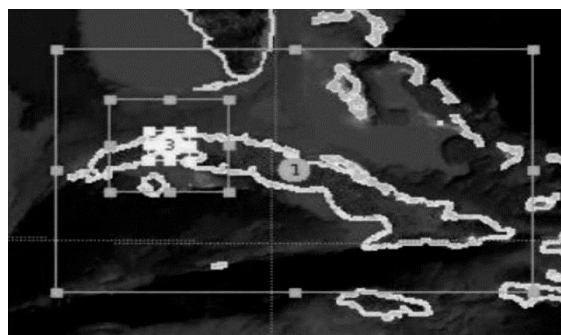


Figura 1. Dominios de modelación

Datos de emisiones

Los modelos fotoquímicos emplean diferentes bases de datos de emisiones, tanto biogénicas como antropogénicas. Para realizar las corridas con el modelo fotoquímico CCATT-BRAMS se utilizaron las bases de datos antropogénicas EDGAR v4.1 y v4.2, GOCART y Yevich_Logan, además de la base de datos biogénica MEGAN. Por otra parte, como el modelo tiene en cuenta el tratamiento de la quema de biomasa, fue necesaria la búsqueda de información referente a emisiones de esta procedencia, datos que fueron obtenidos de los productos de los satélites

GOES-12 - WF_ABBA (*Geostationary Operational Environmental Satellite with Wildfire Automated Biomass Burning* <http://cimss.ssec.wisc.edu/goes/burn/abba.html>); GOES-12 - AVHRR (*Geostationary Operational Environmental Satellite - Advanced Very High Resolution Radiometer*) y de MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) CPTEC-INPE (*Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*) (<http://www.cptec.inpe.br/queimadas/>)

Es necesario señalar que el INGEI disponible para Cuba, no puede emplearse como entrada al modelo pues el mismo no se encuentra espacialmente desagregado, sino que muestra solo las emisiones totales de los contaminantes. No obstante, para la base de emisiones EDGAR v4.2 fue realizada una corrección teniendo en cuenta este inventario ([Contreras et al., 2014](#)).

Datos meteorológicos

En el presente estudio, los datos meteorológicos se obtuvieron de salidas del modelo global del INPE (*Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais*) con configuración T126L28

(http://assimila.cptec.inpe.br/mod_glb.shtml) y resolución de 102 km, los cuales son incorporados al sistema de modelación mediante el pre-procesador meteorológico BRAMS. Su precisión es vital en la exactitud de las salidas numéricas finales y la condición de estar acoplado con el modelo fotoquímico permite la retroalimentación entre ambos en cada paso de la modelación.

Evaluación de los resultados de las variables meteorológicas modeladas

Para la evaluación de los resultados meteorológicos obtenidos por el modelo CCATT-BRAMS, se analizaron diversos factores que intervienen en la forma del cálculo y la precisión de los mismos. Es importante destacar, que el hecho de trabajar con datos

históricos pudiera mejorar los resultados en base a las observaciones obtenidas para el período seleccionado. Se tomaron como variables meteorológicas indicadores en la comparación, la temperatura, la velocidad y dirección del viento; estas dos últimas estimadas a partir de los valores de las componentes U y V del vector viento calculados por el modelo. Para valorar la calidad de los resultados de la modelación meteorológica, se realizó un análisis cuantitativo de los mismos mediante el uso de funciones estadísticas sencillas recomendadas para ello ([Turtós et al., 2003](#)). Los estadígrafos empleados en nuestro análisis fueron:

- Error medio absoluto (MAE):

$$MAE = \sum_{i=1}^N \frac{|\varphi_i - \varphi_{iobs}|}{N} \quad (1)$$

φ_i : valor pronosticado para la celda i

φ_{iobs} : valor observado para la celda i

N: número de valores analizados

- Error medio cuadrático (RMSE): similar al MAE pero debido a su término cuadrático es más sensible a errores puntuales de gran magnitud.

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N \frac{(\varphi_i - \varphi_{iobs})^2}{N}} \quad (2)$$

- Sesgo (BIAS): proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar una variable, es decir, nos cuantifica el error sistemático del modelo.

$$BIAS = \sum_{i=1}^N \frac{(\varphi_i - \varphi_{iobs})}{N} \quad (3)$$

En la [tabla 1](#) se representa el margen de tolerancia para cada una de las variables simuladas.

Para la aplicación de los estadígrafos se utiliza el método de verificación celda-punto, el cual se fundamenta en la comparación de valores observacionales puntuales con los resultados de la modelación en las celdas correspondientes al sitio de observaciones ([Pielke, 1984](#)). Se emplea para este fin la estación meteorológica 78325 Casablanca, localizada en los 23.17° de latitud norte y los -82.35° de longitud oeste, contando para el

Tabla 1. Valores de referencia para la validación

Estadígrafos	Tolerancia	Variable
MAE	± 2°C	Temperatura
	± 2 m/s	Velocidad del viento
RMSE	± 2°C	Temperatura
	± 2 m/s	Velocidad del viento
BIAS	± 0.5°C	Temperatura
	± 0.5 m/s	Velocidad del viento

análisis con los datos meteorológicos trihorarios para el período de modelación.

Sistema de modelación CCATT-BRAMS

El sistema de modelación CCATT-BRAMS, en general, resuelve la ecuación de masa para cada gas traza y aerosol. Un archivo de entrada (chem-ramsin.inp) permite al usuario definir la configuración de las rejillas, seleccionar las parametrizaciones y los esquemas numéricos que serán utilizados, entre otras opciones. La lectura de los datos de entrada y el pos-procesamiento de estos, son realizados por otros programas que conforman el sistema CCATT-BRAMS, y que son representados en la [figura 2](#).

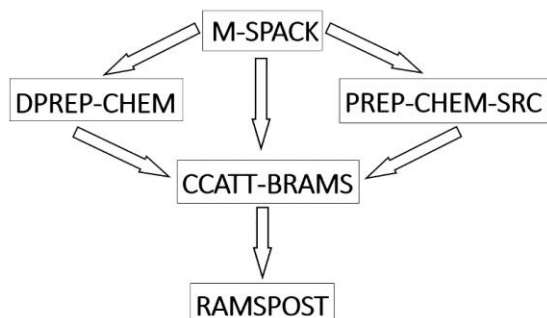


Figura 2. Flujograma del CCATT-BRAMS

Las emisiones son introducidas al modelo mediante el pre-procesador de emisiones PREP-CHEM-SRC, actualmente empleado también en el modelo WRF-CHEM. ([Grell et al., 2005](#)).

El archivo prep-chem-src.inp permite al usuario escoger las configuraciones que serán usadas en el pre-procesador: bases de datos, mecanismo químico, características de las rejillas, proyección geográfica, etc.

Por otra parte, dado que el término de las transformaciones químicas es uno de los más complejos a resolver en la modelación de la calidad del aire, es importante la inclusión de mecanismos químicos en el código del CCATT-BRAMS. Esto se realiza a partir de una versión modificada del pre-procesador químico SPACK (Simplified Preprocessor for Atmospheric Chemical Kinetics), de ahora en adelante Modified-SPACK o M-SPACK ([Longo et al., 2011](#)). Los archivos de entrada definen el mecanismo químico escogido y se genera como salida el conjunto de subrutinas correspondientes para CCATT-BRAMS, con el cual debe ser compilado. A través de esta herramienta, fueron incluidos los mecanismos químicos CB-07 (*Carbon Bond vers. 07*), RACM (*Regional Atmospheric Chemistry Mechanism*), RADM (*Regional Acid Deposition Model*) y RELACS (*Regional Lumped Atmospheric Chemical Scheme*). En el presente estudio, el mecanismo químico seleccionado fue RELACS, recomendado por estudios previos en el INPE ([Sánchez, 2011](#)).

El M-SPACK incluye tres métodos numéricos para la solución del término químico. Los archivos que describen el mecanismo químico, tienen en cuenta las reacciones químicas, las tasas de velocidades de las reacciones, las tasas de fotólisis, así como datos asociados a especies químicas que son necesarios para modelar la deposición seca y húmeda.

El CCATT-BRAMS requiere como datos de entrada las condiciones iniciales y de contorno, meteorológicas y químicas, que usualmente son obtenidas a partir de salidas de modelos

globales. El DPREP es la herramienta que procesa esta información para luego ser usada por el modelo, mediante una compatibilización entre las especies obtenidas por el modelo global y las especies del mecanismo químico.

El RAMSPOST es la herramienta que procesa la salida binaria del CCATT-BRAMS y produce archivos para visualización en formato GRADS u otros. Permite la extracción de variables incluidas en los archivos de salida del CCATT-BRAMS, meteorológicas o químicas y las conversiones de unidades. La visualización de las variables en este estudio se realizó utilizando el software GRADS (*Grid Analysis and Display System*).

Modelación con CCATT-BRAMS

La configuración seleccionada para las parametrizaciones disponibles se muestra en la [tabla 2](#).

Se realizaron dos corridas en el período de modelación seleccionado. Para la primera se emplearon las bases de datos de emisiones EDGAR v4.1 y Yevich_Logan y se comprobó que las salidas de las emisiones de ambas bases de datos, al ser procesadas por el PREP-CHEM presentaron diferencias apreciables ([Contreras et al., 2014](#)). Por ello, se realizó una segunda corrida utilizando EDGAR v4.2 normalizada al INGEI, destacándose el mayor alcance temporal de la misma y su mejor desagregación. Finalmente se accedió al procesamiento de las salidas para su visualización en GrADS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación de los resultados meteorológicos obtenidos de la modelación

Para evaluar la calidad de los resultados meteorológicos obtenidos con el modelo CCATT-BRAMS, estos fueron comparados con las mediciones realizadas en la estación 78325 Casablanca, durante los días 4 a 13 de agosto de 2009, en los horarios correspondientes a las observaciones trihorarias, en este caso: 01:00 AM, 04:00AM,

07:00 AM, 10:00 AM, 01:00 PM, 04:00PM, 07:00 PM y 10:00 PM, siempre hora local. Se aplicaron los estadígrafos recomendados para estos fines para la temperatura del aire y velocidad y dirección del viento, como mencionamos anteriormente.

Temperatura del aire y velocidad del viento

El resultado de aplicar los estadígrafos a la temperatura del aire y velocidad del viento aparece en la [tabla 3](#).

Los indicadores estadísticos revelan buena correspondencia entre los resultados de la modelación y las observaciones reportadas en la estación de Casablanca. Se obtienen valores promedios del MAE y el RMSE inferiores a 0.5°C para el caso de la temperatura del aire, destacándose que para ninguno de los casos se superaron los 2°C establecidos como margen de tolerancia. Para el BIAS, se encontraron valores inferiores a los 0.5°C establecidos, con apreciable tendencia a sobreestimar las observaciones, reflejado en valores positivos de este estadígrafo en todos los casos. Esto se puede observar en la [figura 3](#), en la cual se presentan los valores promedios de temperatura del aire obtenidos de la modelación y las observaciones, comprobándose la estrecha relación indicada por los estadígrafos.

Realizando un análisis similar al de la temperatura del aire, el MAE y el RMSE muestran valores inferiores a los ± 2 m/s en el caso de la velocidad del viento. Es importante señalar también que los resultados obtenidos después de aplicar dichos estadígrafos a esta variable, son ligeramente superiores a los obtenidos para la temperatura del aire, lo cual está en correspondencia con la mayor dificultad para modelar esta variable en sentido general.

En el caso del BIAS, es evidente que hay una tendencia a sobreestimar las observaciones, identificándose valores positivos de este estadígrafo para todos los días analizados. Este problema de sobreestimación se aprecia mejor en la [figura 4](#).

Tabla 2. Parametrizaciones seleccionadas para las corridas

Parametrizaciones	
Lateral Boundary	Klemp & Wilhemson
Radiación	CARMA
Capa Límite Planetaria (PBL)	Meyor-Yamada
Cúmulos	Grell

Tabla 3. Resultados de la aplicación de los estadígrafos a los valores de temperatura del aire y velocidad del viento obtenidos con CCATT-BRAMS

Día de Agosto	Temperatura del aire			Velocidad del viento		
	MAE ($\pm 2^\circ\text{C}$)	RMSE ($\pm 2^\circ\text{C}$)	BIAS ($\pm 0.5^\circ\text{C}$)	MAE ($\pm 2\text{m/s}$)	RMSE ($\pm 2\text{m/s}$)	BIAS ($\pm 0.5\text{m/s}$)
4	0.102	0.288	0.101	0.230	0.651	0.209
5	0.258	0.729	0.155	0.275	0.779	0.254
6	0.154	0.435	0.089	0.278	0.788	0.257
7	0.096	0.270	0.022	0.273	0.771	0.252
8	0.111	0.313	0.076	0.282	0.798	0.275
9	0.106	0.301	0.022	0.282	0.797	0.275
10	0.100	0.284	0.001	0.277	0.784	0.182
11	0.111	0.313	0.062	0.331	0.936	0.243
12	0.098	0.276	0.050	0.345	0.975	0.257
13	0.478	0.169	0.323	0.306	0.866	0.219
Promedio	0.161	0.338	0.090	0.288	0.814	0.242

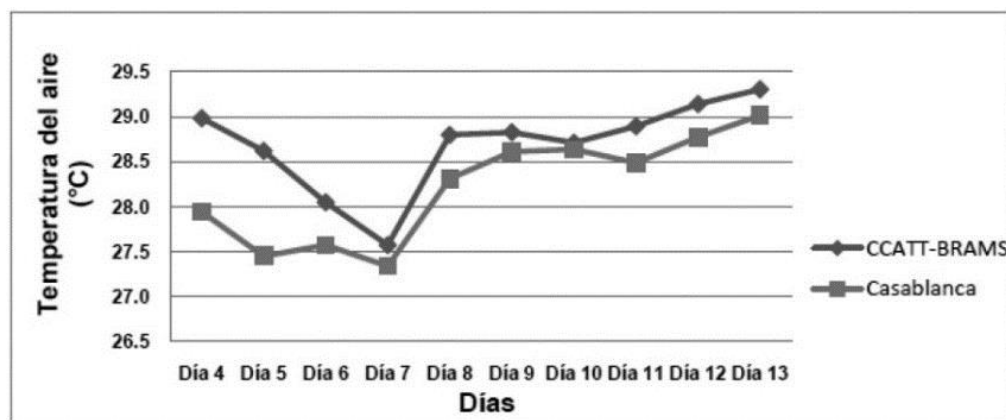


Figura 3. Valores promedio de temperatura del aire obtenidos con CCATT-BRAMS y las observaciones en la estación de Casablanca

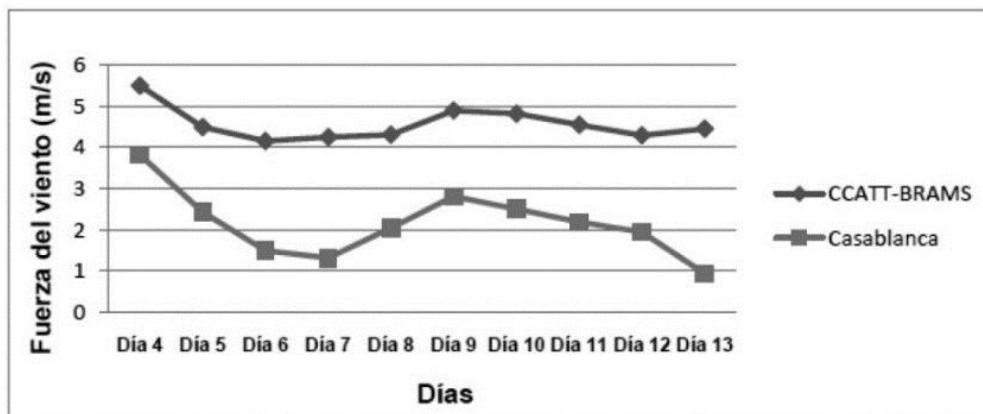


Figura 4. Valores promedio de velocidad del viento obtenidos con CCATT-BRAMS y las observaciones en la estación de Casablanca

En un estudio realizado para la evaluación de la implementación del modelo WRF para la modelación de parámetros de calidad de aire en Cuba (Turtós *et al.*, 2013), se concluyó que para la estación de Casablanca, este presenta un buen comportamiento para ambas variables, con valores promedio menores de 2°C y 2 m/s para el RMSE y el MAE y menores de 0.5°C y 0.5 m/s para el BIAS. En la [tabla 4](#) se muestran estos resultados además del promedio resultante de los días modelados con CCATT-BRAMS para cada estadígrafo, con el objetivo de establecer una comparación entre ambos.

Los estadígrafos indican que los valores de las variables modeladas son muy cercanos a los observados en la estación meteorológica, incluso el CCATT-BRAMS presenta una mejor aproximación, aunque hay que tener en consideración que solo se modelaron 10 días, por un año con WRF. De forma general puede decirse que, para el caso de estudio seleccionado, el modelo CCATT-BRAMS modela con buena exactitud la temperatura del aire y la velocidad del viento, variables meteorológicas muy importante en los estudios de contaminación ambiental.

Dirección del viento

La [figura 5](#) representa la distribución espacial de la dirección del viento modelado con CCATT-BRAMS para el 9 de agosto a las 7:00 AM y 1:00 PM. Estos resultados fueron

comparados con las observaciones de Casablanca, comprobándose la buena correspondencia entre ambos.

Al realizar la comparación, se encontró que los resultados de la modelación con CCATT-BRAMS fueron análogos a los de Casablanca, ya que para este día se reportaron, según el instituto, vientos del Este para las 7:00 de la mañana y del Nordeste para la 1:00 de la tarde. Aunque solo se muestra un resultado de los obtenidos, en todos los días evaluados se observa la misma correspondencia, por lo que se puede expresar que el modelo ofrece una muy buena exactitud para la simulación de esta variable, tan importante en los estudios de contaminación.

Resultados de la modelación para los principales contaminantes considerados

Se obtuvo la evaluación y comparación de los resultados de las salidas del CCATT-BRAMS, utilizando las bases de emisiones EDGAR v4.1 complementada con Yevich_Logan (YL) con las salidas resultantes de emplear EDGAR v4.2, para los principales contaminantes seleccionados en este estudio: CO, NO₂, O₃ y SO₂.

Se empleó EDGAR v4.1, con resolución de 0.1 x 0.1 grados de Lat/Long para el último año reportado (2005) sobre el Dominio D-1, complementada con Yevich_Logan (YL), base de datos estima las emisiones provenientes del uso de los biocombustibles y la quema de

Tabla 4. Resultados de los estadígrafos a los valores de temperatura del aire y velocidad del viento obtenidos con WRF y CCATT-BRAMS para la estación de Casablanca

Modelos	Temperatura del aire			Velocidad del viento		
	MAE ($\pm 2^{\circ}\text{C}$)	RMSE ($\pm 2^{\circ}\text{C}$)	BIAS ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$)	MAE ($\pm 2\text{m/s}$)	RMSE ($\pm 2\text{m/s}$)	BIAS ($\pm 0.5\text{m/s}$)
WRF	1.117	1.659	0.216	1.888	1.459	0.335
CCATT-BRAMS	0.135	0.381	0.035	0.355	1.261	0.067

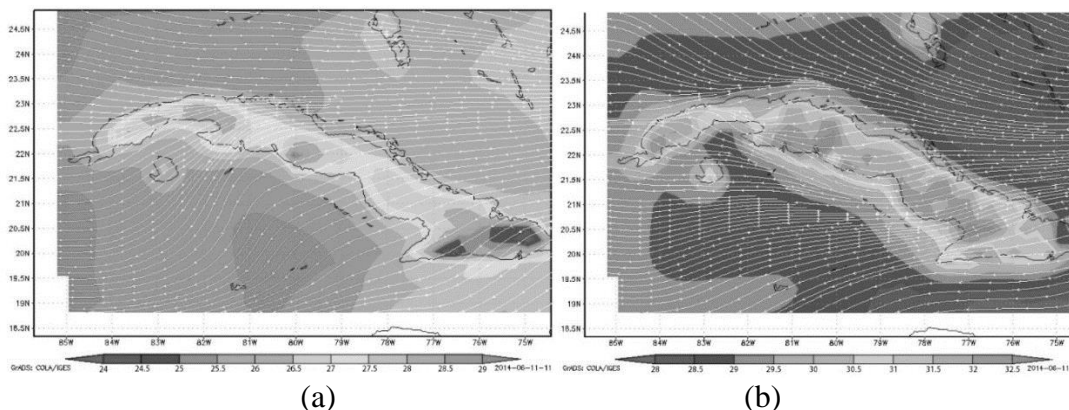


Figura 5. Dirección del Viento modelado con CCATT-BRAMS, día 9 de agosto dominio D-1, a) 7:00 AM b) 1:00 PM

residuos agrícolas y la misma posee una resolución espacial de 1 x 1 grados.

Se empleó una versión de EDGAR v4.2 validada, corregida y normalizada al INGEI para todos los contaminantes tratados con una resolución de 0.1 x 0.1 grados de Lat/Long. (Contreras et al, 2014).

En las tablas 5 y 6 se muestran los valores de las concentraciones promedio de los contaminantes modelados para resoluciones de 27 km y 3 km, dominios D-1 y D-3, respectivamente.

Los resultados de la modelación con CCATT-BRAMS no presentan diferencias muy notables para ninguno de los contaminantes considerados aunque es válido destacar que de forma general, los valores de las concentraciones obtenidas con CCATT-BRAMS utilizando EDGAR v4.2 son superiores en magnitud.

Para las concentraciones de CO obtenidas con CATT-BRAMS y EDGAR v4.1+YL se están considerando emisiones producto de la

quemada de madera para uso energético y residuos en los campos, así como uso de residuos y estiércol como bio-combustibles. Está se incluyen en la base de datos Yevich_Logan y no en EDGAR v4.1. Si comparamos las salidas de CCATT-BRAMS con ambas configuraciones de bases de datos propuestas, se concluye que en el dominio D-1, los resultados son similares, mientras que en D-3, CCATT-BRAMS con EDGAR v4.2 estima concentraciones superiores pues considera mayores emisiones sobre La Habana. Para NO₂ se puede apreciar que CCATT-BRAMS con EDGAR v4.1+YL estima menores concentraciones que con EDGAR v4.2, debido al incorrecto procesamiento de las emisiones de NO_x por el PREP-CHEM con EDGAR v4.1 que provoca que las emisiones totales a la salida del mismo sean aproximadamente la mitad de las de entrada, unido a la baja contribución de la base de datos YL a los totales de NO_x. Esta dificultad se solucionó al realizar la modelación con EDGAR v4.2, obteniéndose mejores

Tabla 5. Concentraciones promedio de CO, NO₂, O₃ y SO₂ (ppb y µg/Nm³) obtenidos con CCATT-BRAMS (EDGAR v4.1+YL y v4.2), D-1 (27 km)

D-1, 27 km			
Contaminantes		CCATT-BRAMS	CCATT-BRAMS
(Unidades)		(EDGARv4.1+YL)	(EDGAR v4.2)
CO	Ppb	70.0 - 140.0	60.0 - 150.0
	µg/m ³	80.1 - 160.2	68.6 - 171.6
NO ₂	Ppb	0.2 - 1.4	0.5 - 6.5
	µg/m ³	0.4 - 2.6	0.94 - 12.2
SO ₂	Ppb	0.5 - 6.0	3.0 - 33.0
	µg/m ³	1.3 - 15.7	7.8 - 86.3
O ₃	Ppb	16.0 - 27.0	18.0 - 29.0
	µg/m ³	31.4 - 53.0	35.3 - 56.9

Tabla 6. Concentraciones promedio de CO, NO₂, O₃ y SO₂ (ppb y µg/Nm³) obtenidos con CCATT-BRAMS (EDGAR v4.1+YL y v4.2), D-3 (3 km)

D-3, 3 km			
Contaminantes		CCATT-BRAMS	CCATT-BRAMS
(Unidades)		(EDGAR v4.1+YL)	(EDGAR v4.2)
CO	Ppb	80.0 - 170.0	80.0 - 270.0
	µg/m ³	91.5 - 194.5	91.5 - 308.8
NO ₂	Ppb	0.5 - 6.0	5.0 - 40.0
	µg/m ³	0.9 - 11.3	9.4 - 75.2
SO ₂	Ppb	5.0 - 40.0	3.0 - 36.0
	µg/m ³	13.08 - 104.64	7.85 - 94.17
O ₃	Ppb	17.0 - 20.5	10.0 - 32.0
	µg/m ³	33.4 - 40.2	19.6 - 26.8

resultados. como se muestra en la [figura 6\(b\)](#) donde los aportes de NO₂ por fuentes localizadas cerca del Mariel son perfectamente identificados. Una de las razones que pudiera influir en estos resultados es la diferencia de resolución de la base de datos YL con la EDGAR v4.1.

En el caso del SO₂, se aprecian valores superiores obtenidos con el CCATT-BRAMS y EDGAR v4.2. Esto puede atribuirse a que EDGAR v4.2 duplica las emisiones de SO₂ de EDGAR v4.1, debido a la normalización al inventario nacional, lo cual hace que los resultados obtenidos sean más cercanos a la realidad. La [figura 7](#) muestra la distribución espacial del SO₂ para el dominio de modelación

D3. Se aprecia que las zonas próximas a Mariel y el litoral norte habanero, presentan las mayores concentraciones como se esperaba y solo CCATT-BRAMS con EDGAR v4.2 logra simular adecuadamente esta distribución espacial de la variable.

En el caso del O₃ se observa que los valores obtenidos son muy similares en todos los casos analizados y se corresponden con las medias correspondientes al mes de agosto en el país ([Ramírez, 1989](#)). En la [figura 8](#) se muestra la distribución espacial de O₃ obtenida para el dominio de modelación D3.

Las máximas concentraciones promedio de O₃ se localizan al norte de Pinar del Río, con otros relativos hacia las provincias orientales.

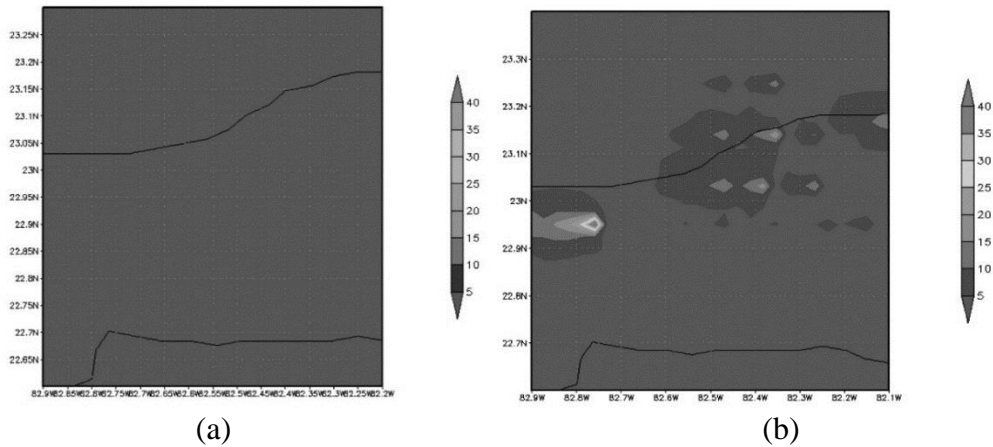


Figura 6. Concentraciones promedio de NO₂, dominio D-3. (a) CCATT-BRAMS con EDGAR v4.1+YL. (b) CCATT-BRAMS con EDGAR v4.2

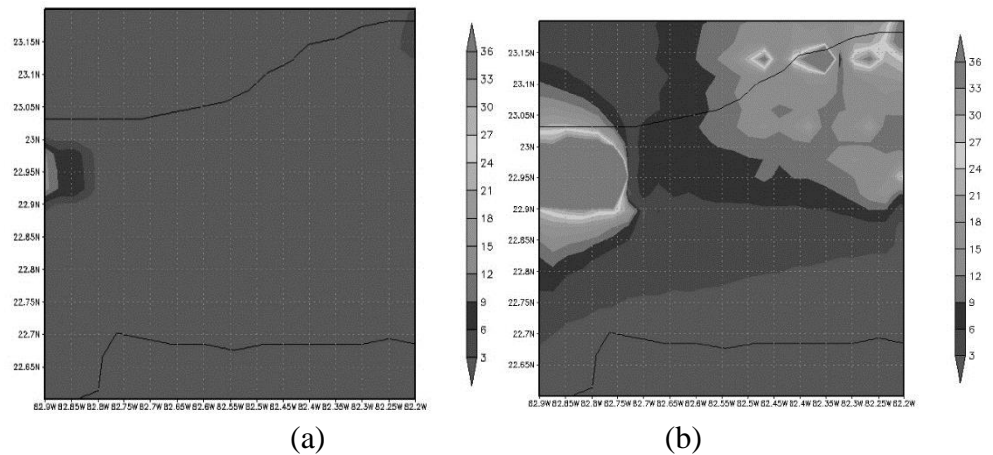


Figura 7. Concentraciones promedio de SO₂ (ppb), dominio D-3. (a) CCATT-BRAMS con EDGAR v4.1+YL. (b) CCATT-BRAMS con EDGAR v4.2

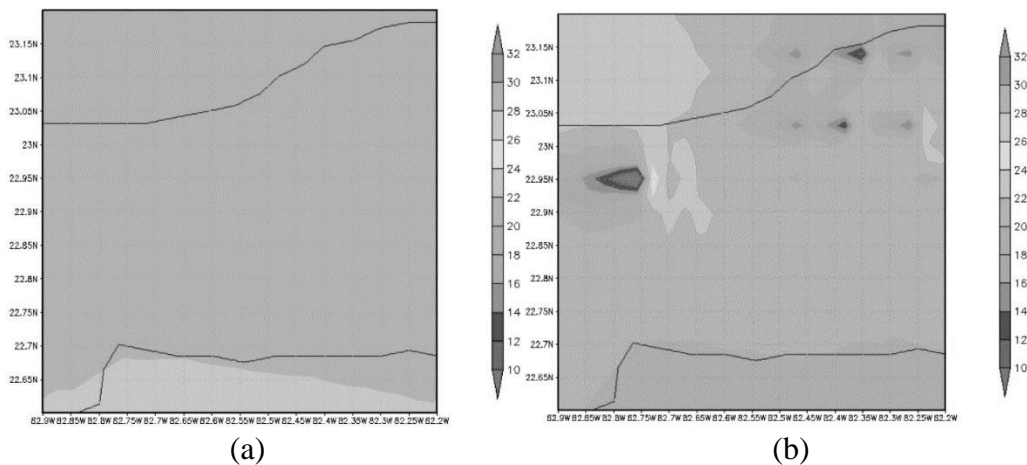


Figura 8. Concentraciones promedio de O₃ (ppb), dominio D-3. (a) CCATT-BRAMS con EDGAR v4.1+YL. (b) CCATT-BRAMS con EDGAR v4.2

Es válido señalar que en este período del año, no hay transporte del O₃ producido en Estados Unidos y México pues las masas de aire provienen del este, por lo que los valores obtenidos se deben casi exclusivamente a la contribución de las fuentes ubicadas en el dominio de estudio, cuyas emisiones de precursores de O₃ permiten la formación de este importante contaminante atmosférico de origen secundario.

Comparación de los resultados con la NC 1020:2014

Para la comparación de los resultados obtenidos en la modelación con CCATT-BRAMS y EDGAR v4.2, con la [NC 1020:2014](#) se utiliza la metodología explicada anteriormente.

Las comparaciones fueron realizadas para los resultados de la modelación con 3 km (D3) de resolución, es decir, con énfasis en las provincias Artemisa, Mayabeque y La Habana. Para el caso del SO₂ y el NO₂ fueron evaluados solamente los períodos de 1 y 24 horas, mientras que para el CO y O₃ los de 1 y 8 horas, debido a que el período de estudio de esta investigación en general fue solo de 10 días, por lo que no se pudo realizar el análisis para un año completo. Fue desarrollado un programa en C++, que devuelve la cantidad de violaciones para cada contaminante y su localización dada en Latitud/Longitud.

En la [tabla 7](#) se presentan los resultados obtenidos con este análisis, aunque hay que tener en cuenta que el período de estudio no es representativo, por lo que de ellos no se puede inferir el estado de la calidad del aire en esta región, aunque sí es una aproximación al mismo.

De forma general, para O₃ y CO en ninguna de las determinaciones se incumplió el valor

indicado por el percentil correspondiente e incluso, puede agregarse, que tampoco fue superada la concentración máxima admisible establecida por la norma cubana. Mientras que en el caso del SO₂ y el NO₂, si ocurrieron violaciones en algunos receptores dentro del área de interés, al superarse las máximas concentraciones admisibles en más oportunidades que los percentiles indicados.

Para el caso del SO₂, los 36 receptores que superaron el percentil en el período de una hora, se localizan entre los 22.87° y 23.113° Lat N, y los -82.904° y -82.73° Long O, coordenadas entre las que se encuentra ubicado el Mariel, lo cual se corresponde con la [figura 7](#). El receptor que presentó mayor número de violaciones se localiza en los 22.95° Lat N y -82.759° Long O, con un total de 427 violaciones. Para 24 horas se encontraron 268 receptores críticos, distribuidos prácticamente en todo el dominio de modelación D-3; aunque es válido señalar que el mayor número de ellos están distribuidos entre los 22.924° y 22.978° Lat N y los -82.904 ° y -82.875° Long O, área cercana al Mariel, con un total de 18 violaciones.

Para el NO₂ fueron encontradas para 24 horas, 27 violaciones, de las cuales 25 se presentaron entre los 22.924° y 22.897° Lat N, y los -82.904° y -82.73° Long O, mientras las 2 restantes se localizaron específicamente en los 23.032° Lat N y los -82.382° Long O y 23.032° Lat N y los -82.266° Long O, ubicaciones que coinciden con las zonas de máximas concentraciones de NO₂ que se observan en la [figura 6b](#).

En la [figura 9](#) se representan las dos regiones donde la calidad del aire se vio más afectada, pues en estas se encontraron los mayores números de violaciones de la CMA.

Tabla 7. Cumplimiento de la NC 1020:2014 en los períodos evaluados

Contamin.	CMA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiemp de Exp.	Determ.	Percentil	Recept. Críticos	Num Max de Volaciones
SO ₂	250 (p95)	1 hora	480	24	36	427
	45 (p98)	24 horas	20	0	268	18
NO ₂	160 (p95)	1 hora	480	24	0	0
	40 (p98)	24 horas	20	0	27	18
CO	25000	1 hora	480	no	0	0
	8000	8 horas	320	no	0	0
O ₃	150 (p95)	1 hora	480	24	0	0
	100 (p98)	8 horas	320	16	0	0

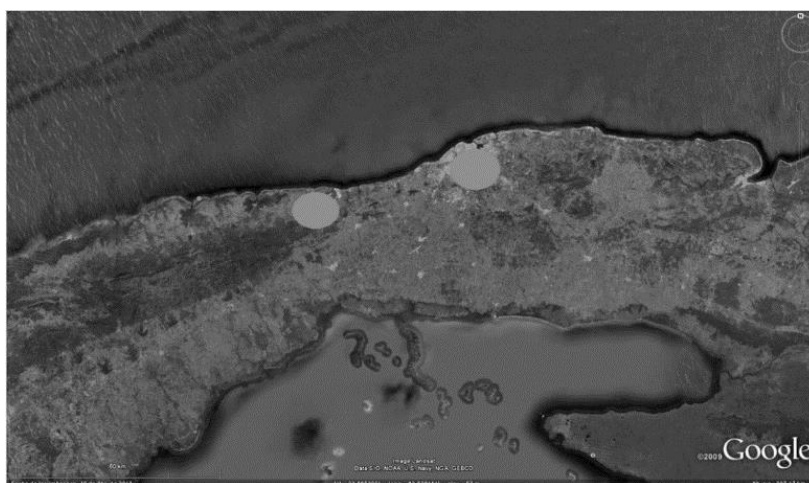


Figura 9. Áreas donde se encontraron las principales violaciones de la norma

CONCLUSIONES

Se ha demostrado la capacidad del modelo fotoquímico acoplado CCATT-BRAMS de simular, con adecuada precisión, los niveles de concentración de los contaminantes estudiados sobre el área de interés y que constituye una herramienta importante para la evaluación de la calidad del aire en Cuba.

Se realizaron corridas del modelo por vez primera sobre Cuba con dominios anidados de resolución de 27-9-3 km, con una configuración propuesta para las condiciones presentes y considerando todas las fuentes de emisiones, a partir de dos variantes de bases de datos seleccionadas, con diferencias apreciables en los resultados obtenidos.

Los estadígrafos aplicados a las principales variables meteorológicas modeladas con CCATT-BRAMS indican que los valores son consistentes con las observaciones de la estación de Casablanca, sobre todo en la temperatura del aire. El resto de las variables meteorológicas analizadas también presenta una buena correspondencia.

Las concentraciones de los principales contaminantes criterio y sus distribuciones espaciales fueron obtenidas con el modelo CCATT-BRAMS y son consistentes con la teoría y las escasas mediciones disponibles.

REFERENCIAS

Contreras et al. (2014). *Inventario de emisiones espacialmente distribuido para estudios de la química atmosférica en Cuba*. Tesis

- presentada en opción al título de Licenciado en Meteorología. InSTEC. La Habana, Cuba.
- Finlayson, B. & Pitts, J. (1999). *Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere*. Academic Press. [Versión electrónica].
- Freitas, S. et al. (2009). *The Coupled Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System (CATT-BRAMS) – Part 1: Model description and evaluation*. Atmospheric Chemistry and Physics. Brasil.
- Grell, G. et al. (2005). *Fully coupled “online” chemistry within the WRF model, Atmospheric Environment*. s/e [Versión electrónica].
- Longo, K. et al. (2011). *The Chemistry-CATT BRAMS Model: a New Efficient Tool for Atmospheric Chemistry Studies at Local and Regional Scales*. s/e [Versión electrónica].
- NC 1020:2014: *NORMA CUBANA. Calidad del aire-Contaminantes-Concentraciones Máximas Admisibles y Valores Guías en Zonas Habitables*.
- Pielke, A. (1984). *Mesoscale Meteorological Modeling*. Orlando: Academic Press.
- Ramírez, J. (1989). *Estudio de las variaciones en las concentraciones de ozono troposférico en Cuba y su vinculación con algunos fenómenos meteorológicos*. Tesis para la obtención del grado científico de candidato a Doctor en Ciencias Geográficas. La Habana, Cuba.
- Seinfeld, J. & Pandis, S. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. s/e [Versión electrónica].
- Sánchez, M. (2011). *Estudios Numéricos de Química Atmosférica para a Região do Caribe e América Central com Ênfase em Cuba*. s/e [Versión electrónica].
- Turtós L. et al. (2003). *Metodología de estimación de variables meteorológicas secundarias para modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos*. La Habana, Cuba. s/e [Versión electrónica].
- Turtós et al. (2006). *Estudio de contaminación atmosférica producida por grupos electrógenos en Ciudad de la Habana*. La Habana, Cuba. s/e [Versión electrónica].