

## **Análisis de sensibilidad del campo de viento producido por el modelo de diagnóstico CALMET**

Mariam Fonseca-Hernández <sup>(1\*)</sup>, Yandy González-Mayor <sup>(2)</sup>, Ana Carla Fernández-Valdés <sup>(3)</sup>  
y Osvaldo Cuesta-Santos <sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> *Centro de Contaminación y Química Atmosférica del Instituto de Meteorología, Cuba, E-mail: mariam.fonseca@insmet.cu, osvaldo.cuesta@insmet.cu*

<sup>(2)</sup> *Centro de Física de la Atmósfera del Instituto de Meteorología. Habana, Cuba, E-mail: yandy.gonzalez@insmet.cu*

<sup>(3)</sup> *Agencia del Medio Ambiente, Miramar, La Habana, Cuba, E-mail: acfdezvaldes91@gmail.com*

Recibido: octubre 22, 2014	Aceptado: junio 29, 2015
----------------------------	--------------------------

### **Resumen**

El presente estudio examina nueve estrategias diferentes para el uso del Modelo de Pronóstico de Mesoescala Versión 3 refinado con datos de observaciones de nueve estaciones de superficie como datos de entrada al modelo de diagnóstico CALMET con el objetivo de producir un campo de vientos de alta calidad. Además, se estudia la sensibilidad de algunos parámetros de CALMET relacionados con el peso de los campos meteorológicos de entrada y con la orografía. Se validaron los resultados con las observaciones de nueve estaciones de superficie para un periodo de un año utilizando el índice de ajuste, índices de correlación y desviación estándar. Se observó mejores resultados cuando la distancia máxima a partir de la cual el campo de vientos inicial tiene un peso mayor es de 30 km y la distancia desde la estación de superficie a partir de la cual el campo de vientos inicial y la observación tienen un peso igualitario es de 10 km.

**Palabras clave:** CALMET, campo de viento, índice de ajuste, sensibilidad, validación.

### **Abstract**

The present study examines nine different strategies for the use of the Prognostic Mesoscale Model Version 3, refined with observational data from nine surface stations as inputs for the diagnostic CALMET model in order to produce high quality wind field simulations. Furthermore, we want to study the sensitivity of different parameters of CALMET, directly related with the weight of the input meteorological fields and orography. We validate the results with observational data from the nine surface stations, over a one-year period by means of the index of agreement, correlation index and standard deviation. The best results were observed when the maximum distance, for which the initial wind field prevails, was chosen to be 30 km and when the distance from the surface station, where the initial wind field and the observed wind have the same weight, was 10 km.

**Keywords:** CALMET, wind field, index of agreement, sensitivity, validation.

## 1. Introducción

“Diagnóstico del medio ambiente atmosférico producto de las principales fuentes fijas de La Habana” es un proyecto de investigación llevado a cabo por especialistas del Centro de Estudios sobre Contaminación y Química Atmosférica (CECONT) del Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET). Uno de los objetivos del mismo es hacer un estudio de la dispersión de contaminantes atmosféricos liberados por las fuentes fijas de La Habana utilizando un modelo de dispersión de contaminantes atmosféricos. Para llevar a cabo esta tarea se escogió el sistema de modelación CALMET-CALPUFF (SMCC) basándose en las potencialidades del mismo: sus parametrizaciones para terrenos complejos, la posibilidad de simular varias especies y su no estacionalidad (Scire et al., 2000a).

El SMCC cuenta con CALMET como modelo de diagnóstico meteorológico, en este están agrupados un módulo de campo de vientos diagnóstico y módulos micrometeorológicos para las capas límites sobre agua y sobre tierra (Fonseca Hernández, 2013). Este modelo, a pesar de tener algunas limitaciones como el paso temporal obligatorio de una hora lo que hace muy complicado su uso cuando se cuenta con observaciones cada tres horas, es ampliamente utilizado en los estudios de modelación de la calidad del aire para alimentar modelos de transporte, dispersión, transformaciones químicas y deposición de los contaminantes atmosféricos, los cuales son a su vez indispensables para los sistemas de gestión de la calidad del aire.

CALMET permite la asimilación de datos meteorológicos simulados por un modelo de pronóstico y observaciones (de estaciones de superficie, de aire superior y boyas). Estos datos pueden ser combinados utilizando las observaciones para refinar los datos del modelo de pronóstico, opción que se utiliza cuando no se cuentan con datos de sondeos meteorológicos, como en nuestro caso.

CALMET cuenta con varias parametrizaciones que le permiten tener en cuenta diversos procesos a la hora de producir los campos meteorológicos. Existen varios parámetros a la hora de configurar CALMET que requieren generalmente un juicio experto ya que son los que más influyen al realizar el análisis para un sitio en particular (<http://www.src.com/calpuff/FAQ-questions.htm>). La mejor manera de determinar la configuración a utilizar es realizando un análisis de sensibilidad variando estos parámetros, ya que los resultados serán diferentes para distintas localizaciones.

Internacionalmente se han realizado algunos estudios de sensibilidad a CALMET, entre los que podemos citar los realizados por Longoni M G et al., 2001 para un sistema de pronóstico a corto plazo en Lombardy, Italia y los realizados por Tai E et al., 2009 para la posterior simulación de Benceno en el área del puerto de Corpus Christi en EE.UU. Ambos estudios muestran configuraciones diferentes dadas las características particulares de las regiones de estudio en las que fueron realizados. Esto demuestra la necesidad existente de realizar un estudio de sensibilidad de este modelo para nuestra área.

En Cuba hasta ahora no se han realizado estudios de sensibilidad para CALMET, por lo que resultaría útil conocer que configuración es la más adecuada para nuestras propias condiciones, ya que la calidad de los resultados de los posteriores estudios de dispersión dependerá en gran medida de una correcta configuración del modelo meteorológico.

El presente trabajo aborda algunos de los parámetros de configuración del modelo meteorológico CALMET al introducir como datos de entrada datos de un modelo de pronóstico meteorológico: Mesoscale Model 5 Version 3 (MM5V3) y datos de estaciones de observación con el objetivo de determinar que valores introducir en algunos de sus parámetros, de modo que se obtenga un campo de vientos óptimo. Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad y se utilizaron algunas técnicas estadísticas para la comparación de los resultados. Se utiliza como base de datos la información meteorológica (salidas del MM5V3 y datos de estaciones) para un período de un año.

## **2. Materiales y Métodos**

### **2.1 Modelo de Diagnóstico CALMET**

CALMET es un modelo de diagnóstico meteorológico que desarrolla para cada hora los campos de temperatura y viento en una rejilla tridimensional que constituye el dominio de modelación; además incluye campos bidimensionales asociados como la altura de mezcla, características de la superficie y propiedades de dispersión (Scire et al., 2000a). A continuación, se describen algunos de sus pre-procesadores que fueron utilizados en el presente estudio:

- CALMM5: extrae e interpreta los datos del fichero de salida del MM5V3 y crea un fichero de datos meteorológicos como fichero de entrada para CALMET.
- TERREL: introduce los datos de elevación del terreno en una rejilla de modelación especificada por el usuario.
- CTGPROC: introduce los datos de usos de suelo y cobertura terrestre en rejilla de modelación.
- MAKEGEO: pre-procesador geofísico final que lee los datos de usos de suelo y de elevaciones del terreno (que se obtienen de CTGPROC y TERREL respectivamente) y produce un fichero de salida como entrada para CALMET.
- SMERGE: prepara los datos (viento, temperatura, etc.) de las estaciones meteorológicas de observación para ser asimilados por CALMET.

CALMET produce campos de diagnóstico tridimensionales de viento, temperatura, humedad y otros parámetros. Como datos meteorológicos de entrada, CALMET puede utilizar los campos producidos por modelos de pronóstico en combinación con los datos de las estaciones meteorológicas de superficie disponibles. Por definición CALMET produce estos campos con resolución espacial de 1 km y resolución temporal de 1 hora, por este motivo tanto los datos del modelo de pronóstico como los de las estaciones meteorológicas (usualmente con menor resolución) son interpolados por el propio CALMET o por el usuario en el caso específico de los datos de estaciones.

Aunque a medida que disminuye la separación de las celdas de la rejilla de CALMET y se aproxima más a la resolución del modelo de pronóstico meteorológico del cual se alimenta -en este caso del MM5V3- se tiene mejor precisión en todos los cálculos, CALMET necesita una distribución detallada (tanto espacial como temporal) de vientos, temperaturas y humedad etc. a lo largo del dominio de modelación. Sus ecuaciones se basan en las leyes de la física que definen distribuciones de flujo de aire que son consistentes con los efectos del terreno, los gradientes de la temperatura y otros procesos físicos que determinan el movimiento y la mezcla del aire (Scire et al., 2000a).

El modelo meteorológico CALMET contiene un módulo de campo de viento diagnóstico y módulos micrometeorológicos para las capas límites sobre agua y sobre tierra (Fox T, 2012). Para la investigación se usó el módulo de campo de viento diagnóstico con una aproximación de dos pasos para el cálculo de los campos de vientos. En el primer paso (paso 1) un campo de viento inicial se ajusta para los efectos cinemáticos del terreno, flujos de laderas y los efectos de bloqueo del terreno, para producir un campo de viento paso 1 (US EPA, 2009). El segundo paso (paso 2) consiste en un procedimiento de análisis objetivo para introducir los datos de observaciones en el campo de viento paso 1 y de esta manera obtener un campo de viento final (Mayor Y G, 2009).

### **2.2 Datos de entrada para CALMET**

Resulta evidente que cuanto mayor sea la cantidad de mediciones meteorológicas precisas que se pueda suministrar más precisos serán los campos meteorológicos tridimensionales generados por CALMET. A continuación, se describen los datos utilizados por este modelo de diagnóstico.

#### **2.2.1 Datos topográficos**

Los datos de topografía y uso del suelo fueron obtenidos del sitio Web del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) disponible en Internet en el sitio [http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2\\_1/SRTM3](http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3) (Farr et al., 2007) y se usaron para caracterizar las alturas del terreno en una escala horizontal de 90 m y para determinar

también la fricción superficial y las propiedades termodinámicas para cada celda de la rejilla. Aunque CALMET utiliza una resolución de 1 km el empleo de estos datos posibilitó una mejor descripción del terreno.

### 2.2.2 Datos meteorológicos

Se utilizaron los campos meteorológicos del modelo de pronóstico MM5V3 que se corre en el Centro de Física de la Atmósfera (CFA) del INSMET, correspondientes al dominio que tiene una resolución espacial de 9 km. En este caso, se emplearon los campos meteorológicos para el año 2012 con una resolución temporal de 1 hora con el objetivo de evitar interpolaciones temporales que son fuente de errores.

El MM5V3 es un modelo de mesoescala de quinta generación desarrollado por especialistas de la Universidad de Pennsylvania y del Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas (NCAR) desde la década de los 70. Está considerado como un modelo que incluye todos los avances realizados hasta el momento en modelación meteorológica. En el CFA se ha implementado su versión 3 por su alta capacidad para definir sistemas de escala sinóptica, las variadas opciones de parametrización de los procesos físicos, su habilidad de correr con dominios múltiples anidados, su bajo requerimiento de poder computacional y capacidad para asimilar datos en cuatro dimensiones. El formato de salidas binarias del MM5V3 puede ser leído por el modelo de diagnóstico CALMET mediante el pre-procesador CALMM5 destinado para este propósito.

Los campos de vientos obtenidos por el MM5V3 fueron considerados como campo de viento inicial en el modelo de diagnóstico CALMET y para refinar este campo se aprovecharon las observaciones de superficie de 9 estaciones meteorológicas incluidas en el dominio de modelación: Bauta, Batabanó, Bainoa, Casablanca, Güines, Güira de Melena, Santiago de las Vegas, Tapaste y Melena del Sur; ver Fig.1. No se consideró ningún spin-up al correr CALMET porque al utilizar las salidas del MM5V3 se manejan las horas desde la 12 a la 36 de su salida de 72 horas, además de no tener sentido pues el mismo es un modelo de diagnóstico, el spin-up se considera implícito al desechar las primeras 12 horas de simulación del modelo de pronóstico (MM5V3).

Los datos de las estaciones meteorológicas se obtuvieron en el Centro del Clima del INSMET, los cuales tienen una resolución temporal de 3 horas a excepción de la estación Casablanca que poseen una resolución temporal de 1 hora. Los datos provenientes de las estaciones fueron convertidos al formato CD-144 requerido por el pre-procesador SMERGE. Según lo recomendado internacionalmente, es necesario contar hasta con un 90% de datos meteorológicos para lograr una buena simulación (Environment B.C.M.o, 2008). En nuestro caso, aunque se cuenta con un 96% de datos meteorológicos, se optó por sustituir las mediciones faltantes por aquellas pertenecientes a una estación que tuviera condiciones meteorológicas y geofísicas similares.

Como CALMET posee un paso temporal de una hora, la información meteorológica requerida por el modelo debe coincidir con ese intervalo de tiempo. Por tanto, se realizó una interpolación lineal para cubrir las 2 horas de datos faltantes en todas las estaciones (a excepción de Casablanca) según lo recomendado (Environment B.C.M.o, 2008).

### 2.3 Dominio de Modelación

La rejilla de modelación cubre al área de estudio según se muestra en la Fig 1, la cual consta de 120 kilómetros en la dirección zonal por 60 kilómetros en la dirección meridional con una resolución espacial de 1 km y con 10 niveles verticales cuyos topes están situados en las alturas: 0, 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1200, 2000, 3000 y 4000 m. La rejilla de cálculo abarca toda la ciudad de La Habana y algunos municipios de las provincias de Artemisa y Mayabeque. Se utilizó la proyección geográfica Lambert Conformal Conic (LCC).

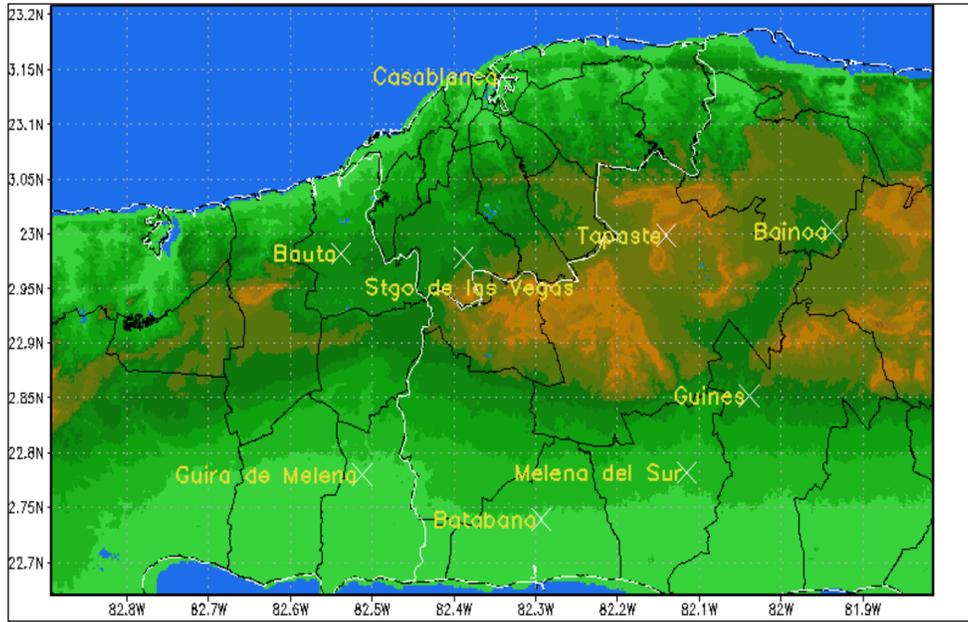


Fig. 1. Área de Estudio. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas en la simulación

**Estudio de sensibilidad de CALMET**

Se definieron 9 estrategias de configuraciones de CALMET en correspondencia con lo estudiado en la bibliografía, con las condiciones de la zona de estudio y relacionadas con la obtención del campo de viento. Sus configuraciones se muestran en la tabla I.

Los parámetros variados fueron aquellos que se utilizan al calcular el campo de viento mediante la aproximación de dos pasos. Las variables IKINE y TERRAD se relacionan con la obtención de viento durante el paso 1 mientras que R1 y RMAX están relacionadas con el segundo paso, donde los valores de vientos observados son combinados con aquellos obtenidos en el primer paso mediante un proceso de análisis objetivo.

**Tabla I:** Parámetros establecidos en las nueve configuraciones utilizadas con CALMET.

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9
<b>IKINE</b>	0	0	0	0	0	0	0	1	0
<b>R1</b>	10 km	1 km	20 km	10 km	0.1 km				
<b>RMAX</b>	20 km	20 km	20 km	10 km	30 km	20 km	20 km	20 km	10 km
<b>TERRAD</b>	10 km	5 km	20 km	10 km	5 km				

Estos parámetros se describen a continuación:

- **IKINE:** Efectos cinemáticos del terreno. El valor 0 significa no incluir los efectos cinemáticos del terreno; si IKINE = 1, entonces sí se incluyen estos efectos. La inclusión de este efecto consiste en calcular la componente vertical de la velocidad del viento en función de la velocidad media del viento en el área de estudio, la altura del terreno y la temperatura potencial en el punto de cálculo (Liu y Yocke, 1980). El viento horizontal se reajusta en consecuencia aplicando un proceso de minimización de la divergencia (Scire et al., 2000a).
- **R1:** Representa la distancia desde la estación de superficie en la cual la observación de superficie y el campo de viento del primer paso presentan un peso igualitario (Scire et al., 2000a). Este valor se emplea en la ecuación de análisis objetivo del campo de viento (paso 2).

- **RMAX:** Representa la máxima distancia posible a partir de la cual el campo de viento calculado en el primer paso tiene un peso mayor en la obtención del campo de viento final (paso 2). Este valor debe escogerse de tal forma de que para cada nodo en el dominio de modelación al menos una estación meteorológica tenga influencia sobre él (Scire et al., 2000a).
- **TERRAD:** Distancia o radio alrededor del nodo de cómputo que CALMET usa en el cálculo de los efectos de bloqueo del terreno. Estos efectos se calculan en función del número adimensional de Froude (Allwine and Whiteman, 1985). Para valores inferiores a 1 de este número la dirección del viento se ajusta para que sea tangente al terreno (Scire et al., 2000a).

Como método de verificación se utilizó el método celda-punto, que consiste en comparar las observaciones con los valores de la celda que le corresponde al sitio de la observación. Se compararon todas las salidas de los campos generados por CALMET con los datos de superficie en los puntos coincidentes con la ubicación de las estaciones meteorológicas, excluyendo, en cada corrida, la información correspondiente de la dirección y velocidad del viento de la estación a comparar, para comprobar si lo predicho por el modelo sin el dato de la estación se ajusta lo mejor posible a lo medido en ese punto.

Para la comprobación meteorológica presentada se ha optado por utilizar el error absoluto medio (MAE) definido por Stauffer y Seaman, 1990 por la ecuación (1). En general este estadígrafo permite medir la precisión de la simulación. Mientras menores sean los valores obtenidos mejor es la precisión de la simulación. Por precisión se entiende el promedio del grado de correspondencia entre pares individuales de valores pronosticados y valores observados.

$$MAE = \sum_{i=1}^N \frac{|P_i - O_i|}{N} \quad Eq.(1)$$

Donde:

$P_i$  es el valor pronosticado para la celda  $i$

$O_i$  es el valor observado para la celda  $i$

$N$  es el número de valores analizados

Se calculó además el sesgo (BIAS), el cual nos proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobreestimar o subestimar una variable y nos cuantifica el error sistemático del modelo. Pielke, 1984 define el BIAS según la ecuación (2):

$$BIAS = \sum_{i=1}^N \frac{(P_i - O_i)}{N} \quad Eq.(2)$$

Donde:

$P_i$  es el valor pronosticado para la celda  $i$

$O_i$  es el valor observado para la celda  $i$

$N$  es el número de valores analizados

Completando la información que aportan estos estadígrafos se ha calculado también un índice que examina el comportamiento del modelo al comparar los resultados con observaciones. El índice de ajuste o IOA, por sus siglas en inglés, se calcula mediante la ecuación (3) (Willmott et al., 1985). Este índice oscila entre 0 y 1. Mientras más cercanos se encuentre el valor del IOA a 1 más cercanos estarán los valores pronosticados por el modelo a los valores observados.

$$IOA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (P_i - P_{mean})^2 + \sum_{i=1}^N (O_i - O_{mean})^2} \quad Eq.(3)$$

Donde:

- $N$  es el número de observaciones
- $P_i$  son los valores pronosticados
- $O_i$  son los valores observados
- $O_{mean}$  es la media de las observaciones
- $P_{mean}$  es la media de los pronósticos

Se utilizó como indicador la variable meteorológica velocidad del viento para la comparación y se tomaron como referencia al evaluar el rendimiento del modelo los valores propuestos por Russell A y Dennis R, 2000 y Borge et al., 2008:

- MAE  $\leq 2$  m/s
- IOA  $\geq 0.6$

Se realizaron histogramas de frecuencia para todas las estaciones y para cada corrida con el objetivo de conocer de una forma más visual en que rango de incertidumbre se encontraba la mayor cantidad de datos para las diferentes parametrizaciones. Así mismo fueron utilizados los diagramas de Taylor, en los cuales se plantea la desviación estándar normalizada en contraposición con la correlación existente entre los datos observados y pronosticados. Un resultado perfecto observado en un diagrama de Taylor debe tener desviación 0 y correlación lineal de 1 (Taylor, 2001).

### **Herramientas utilizadas**

Dada la cantidad de información necesaria para la utilización del sistema de modelación empleado, fue necesario confeccionar una gran cantidad de scripts para el procesamiento de los datos de entrada y salida, los mismos fueron implementados en los lenguajes de programación Python, Fortran y Csh. Para el estudio de sensibilidad se usó el lenguaje de programación R orientado al desarrollo estadístico. Todas las salidas gráficas fueron efectuadas en las herramientas Grads y Gnuplots.

### **3. Discusión de los Resultados**

Con el objetivo de escoger la mejor configuración para CALMET se obtuvieron diagramas de Taylor para cada una de las 9 estaciones que se incluyen en la construcción del campo de vientos final. La Fig 2 muestra el diagrama de Taylor para las estaciones de Casablanca (a) y Batabanó (b). Se escogen estas estaciones ya que los resultados obtenidos para Casablanca son muy similares a los obtenidos para el resto de las estaciones, con excepción de Batabanó.

La dispersión en el diagrama de Taylor encontrada para la estación de Batabanó está determinada por los radios de influencia escogidos en el proceso de interpolación para la obtención del campo de vientos final (paso 2) y también por las características propias de la estación (posición, valores medios del viento relativamente bajos, por ciento de calmas reportadas en los datos observados y cercanía con otras estaciones). Ver Fig. 3 (b).

La estación de Casablanca es la que presenta mejores resultados, esto se debe a que es la estación más alejada de las demás como se puede observar en la Fig 1. La calidad de los resultados obtenidos para esta estación se debe, por un lado, a que la misma está menos expuesta a la influencia de las observaciones de las demás estaciones en el proceso de interpolación que genera el campo de vientos final; por el otro lado los datos de viento obtenidos por el modelo correspondientes a esta estación están menos expuestos a la orografía por ser una estación costera situada en la costa norte del territorio, y el viento predominante durante el período de

estudio proviene del primer cuadrante (entre el Norte y el Este). Ver Fig. 3 (a). En los diagramas de Taylor obtenidos para las estaciones de Bauta, Bainoa, Casablanca, Melena del Sur, Santiago de las Vegas, Güira de Melena, Güines y Tapaste las corridas C\_1, C\_3, C\_4, C\_5, C\_6, C\_7 y C\_8 muestran los resultados más aceptables, y las corridas C\_2 y C\_9 los más malos, siendo la C\_9 la peor. Este comportamiento refleja la dependencia del valor R1 en la obtención del campo de vientos final durante el proceso de análisis objetivo. No es posible definir mediante los diagramas de Taylor obtenidos la corrida óptima ya que el mejor valor obtenido es el mismo para las corridas C\_1, C\_3, C\_4, C\_5, C\_6, C\_7 y C\_8.

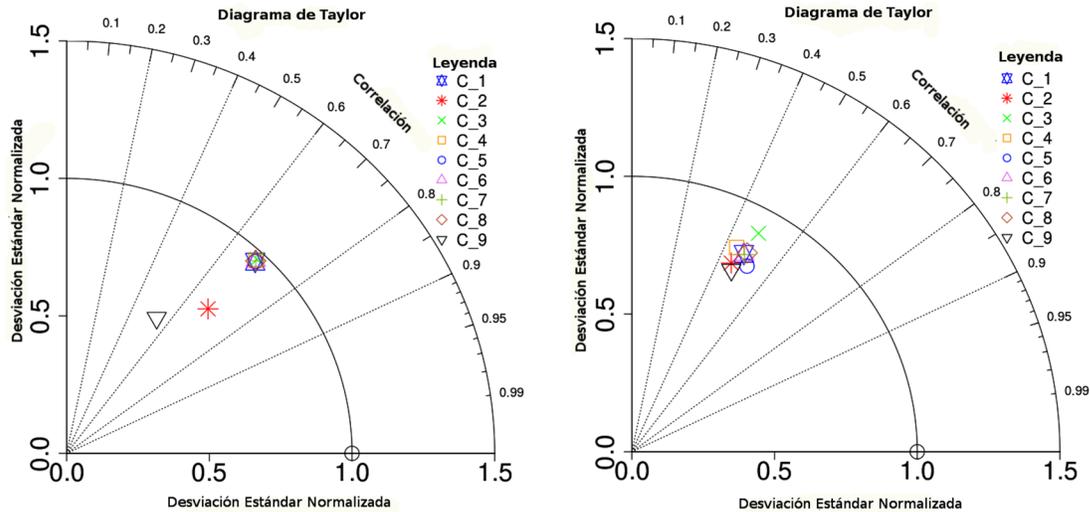


Fig. 2. Diagrama de Taylor. a) Estación Casablanca. b) Estación Batabanó

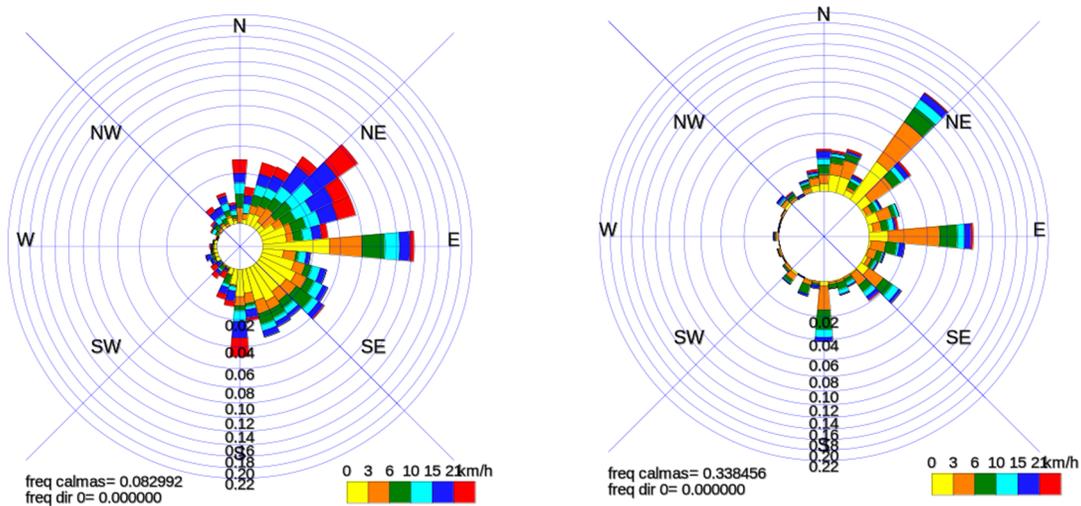


Fig. 3. Rosas de vientos observadas. a) Estación Casablanca. b) Estación Batabanó

En la Fig. 4 se muestra el comportamiento del MAE para las 9 estaciones. Todos los valores obtenidos se encuentran por encima de los valores recomendados. Como se observa las diferencias entre los valores son mínimas, pero la serie es grande y los valores medios tienden a suavizarse. El menor MAE lo presenta la estación de Güira de Melena, esta estación es de todas la que tiene menor media anual de velocidad del viento

y además la de mayor por ciento de calmas, lo que explica este comportamiento. Por el contrario, Casablanca presenta los peores valores de MAE excluyendo a Batabanó, siendo la de mayores velocidades y menor por ciento de calmas. La corrida C\_5 (asterisco rojo) es la que obtiene los mejores resultados. Para la mejor estación: Güira de Melena la corrida C\_5 obtiene los mejores resultados. Se observa que las corridas C\_2 y C\_9 tienen los peores resultados.

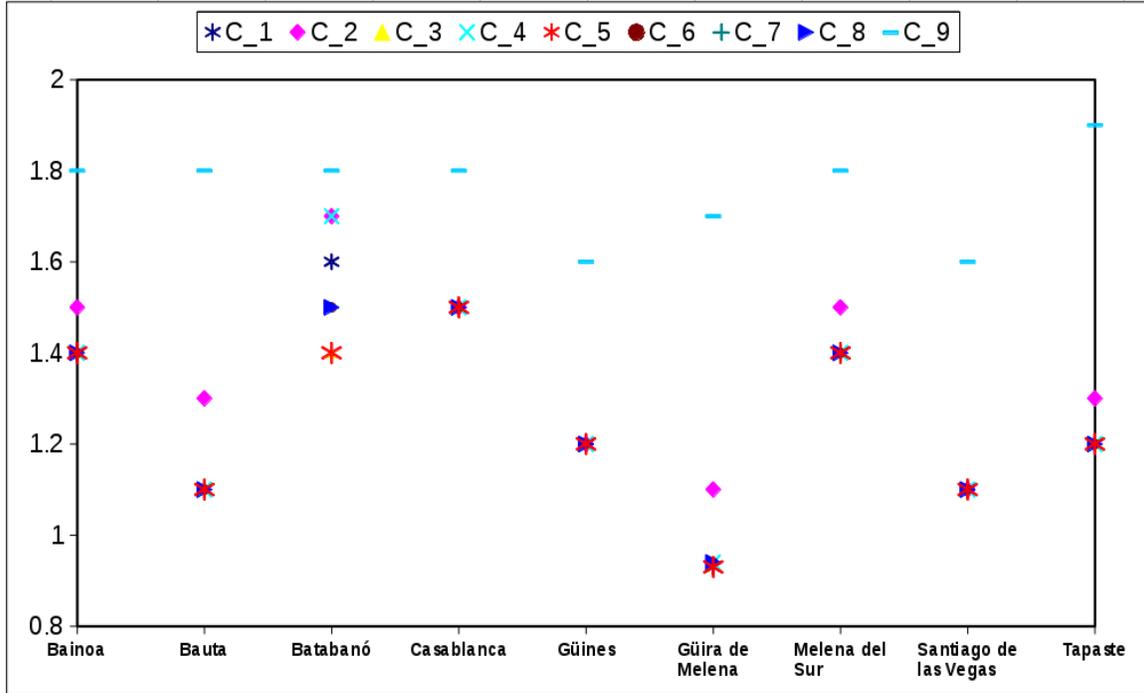


Fig. 4. Comportamiento del Error Absoluto Medio (MAE) calculado para las 9 estaciones en cada una de las 9 configuraciones.

Por otra parte, en la Fig. 5 se muestra el comportamiento del índice de ajuste (IOA) para las 9 estaciones. Los valores más altos del IOA se encontraron para Casablanca y los valores más bajos se reportaron para la estación de Batabanó. La corrida C\_5 (asterisco rojo) obtiene los mejores resultados para todas las estaciones al mismo tiempo, excepto para la estación de Güines para la cual la diferencia entre el valor reportado para esta corrida y el reportado para la mejor es solamente del orden de las centésimas. Esta diferenciación puede estar relacionada con el hecho de que esta corrida es la de mayor RMAX (RMAX=30 km) permitiendo que para algunas estaciones se incluya, durante el procedimiento de análisis objetivo, la influencia de otras estaciones relativamente cercanas. De manera general las diferencias encontradas son pequeñas, pero hay que recordar que el IOA es un valor promediado entre una serie larga de valores pronosticados y observaciones. Las corridas C\_2 y C\_9 obtienen nuevamente los peores resultados.

Por último, se muestra en la Fig. 6 el comportamiento del BIAS para cada estación. Como se puede observar es mayor la tendencia a sobrestimar que a subestimar. Las corridas C\_2 y C\_9 tienden mayormente a sobrestimar las velocidades del viento ya que son las de mayor representación del campo de vientos producido por el MM5V3.

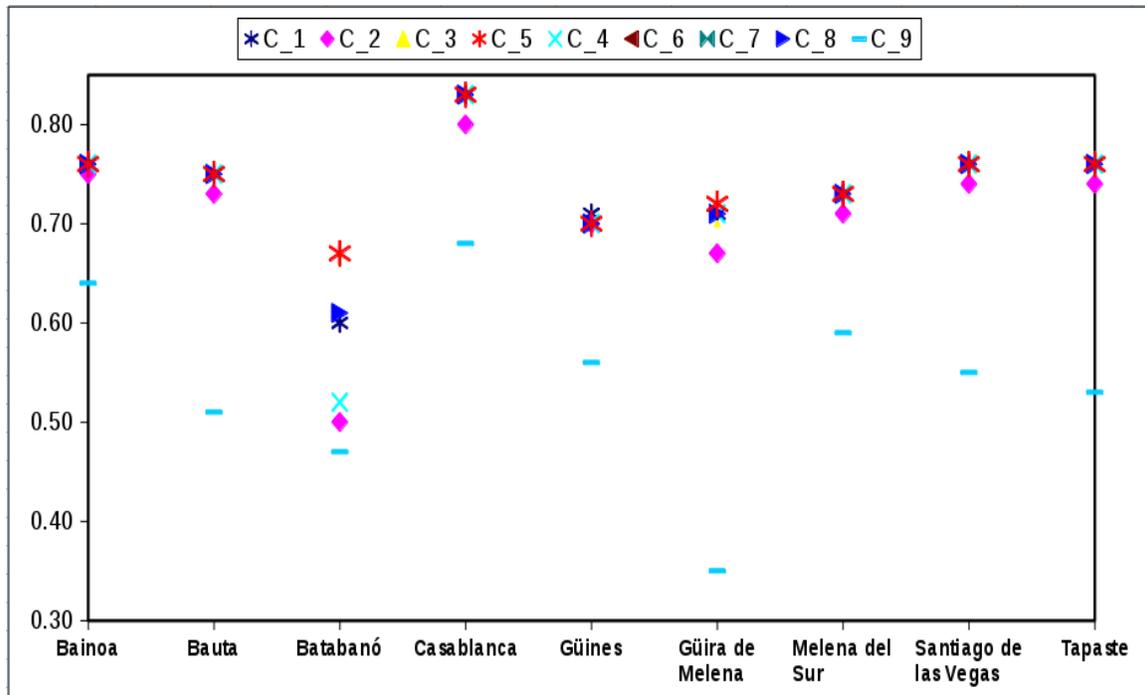


Fig. 5. Comportamiento del Índice de Ajuste (IOA) calculado para las 9 estaciones en cada una de las 9 configuraciones.

El campo de viento obtenido por el MM5V3, que alimenta al modelo de diagnóstico CALMET, puede ser considerado con un campo de viento de mayor escala. Esto se debe a la resolución espacial de 9 km del dominio de integración del modelo (MM5V3) y trae como consecuencia que el efecto de la brisa local no sea significativo en la determinación del vector viento. Como consecuencia la fuerza del viento a esa escala disminuye de norte a sur y de este a oeste ya que la dirección predominante del mismo es de región Este. En este sentido los valores medios del viento pronosticados para la estación de Casablanca son relativamente altos, lo cual produce un sesgo pequeño, mientras que para las estaciones de Güira de Melena y Batabanó los valores medios son relativamente bajos (obteniéndose un sesgo mayor).

El mecanismo de interpolación empleado en el modelo de diagnóstico CALMET no solo suaviza los valores del viento espacialmente (al llevar los datos de 9 km del MM5V3 a la rejilla de CALMET de 1 km) durante la determinación del campo de vientos inicial que se utiliza durante el paso 1, sino que también durante la obtención del campo de viento final (paso 2) con el empleo de los valores reportados por las estaciones y los del MM5V3 previamente suavizados durante el paso 1. Esto explica los valores medios tan bajos reportados por CALMET y como la tendencia es a sobrestimar los valores del viento en las corridas C\_9 y C\_2 (note como estas son las corridas de menor R1) y se subestima por valores muy pequeños para la mayoría de las demás corridas principalmente, cuando el sesgo de los valores medios observados y pronosticados es pequeño.

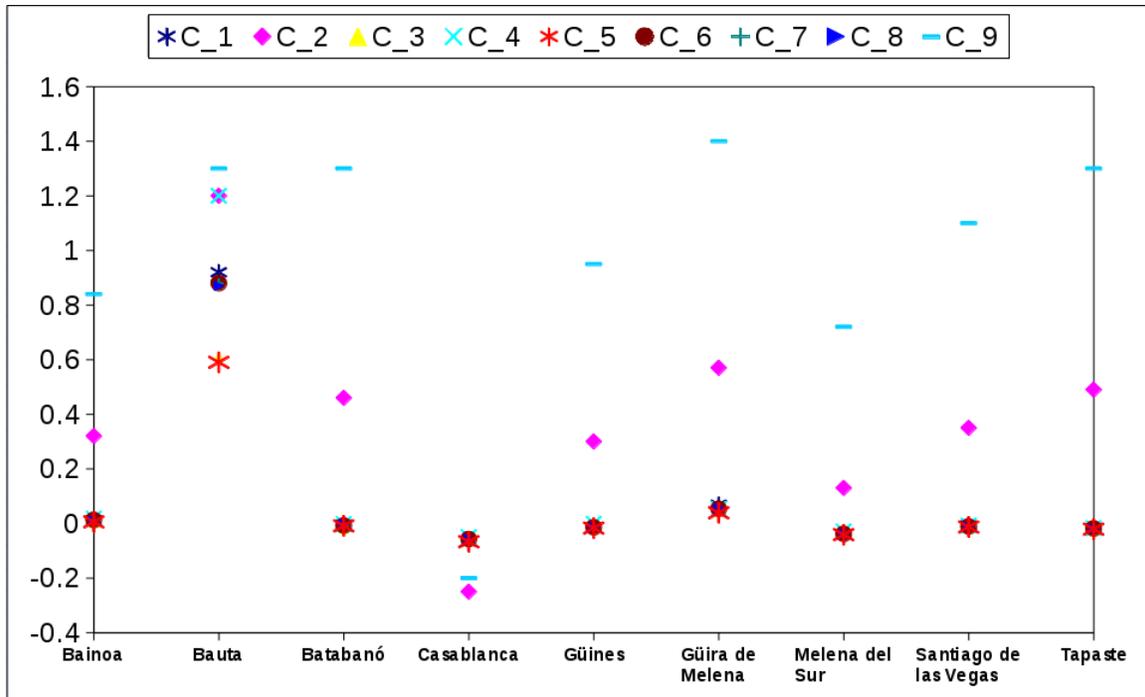


Fig. 6. Comportamiento del BIAS calculado para las 9 estaciones en cada una de las 9 configuraciones.

### Conclusiones y Recomendaciones

El campo de vientos óptimo es el obtenido al configurar CALMET de la siguiente manera: R1 = 10 km, RMAX = 30 km, TERRAD = 10 km, IKINE = 0, estos parámetros son los que se corresponden con la corrida 5 (C\_5) del estudio.

Las corridas C\_2 y C\_9 obtuvieron los peores resultados, de ellas la 9 fue la peor. Se recomienda incluir las estaciones si se requiere un campo de vientos más certero, ya que las configuraciones C\_2 y C\_9 le imparten un peso muy grande al campo de vientos inicial, que es el generado por el MM5V3.

Se recomienda extender el estudio y evaluar además el comportamiento de la dirección del viento y la temperatura al variar estos y otros parámetros, con el objetivo de determinar si su comportamiento sigue las mismas pautas o no que la velocidad del viento. Además, realizar el mismo estudio variando la configuración de la rejilla, ya que a diferentes resoluciones se deben esperar diferentes resultados.

**Referencias Bibliográficas**

- Allwine, K.J. and C.D. Whiteman., 1985. *MELSAR: A mesoscale air quality model for complex terrain: Volume I--Overview, technical description and user's guide*. Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington.
- Borge, R., Alexandrov, V., del Vas, J.J., Lumbreras, J., Rodriguez, E., 2008. A comprehensive sensitivity analysis of the WRF model for air quality applications over the Iberian Peninsula. *Atmospheric Environment*, 42, 8560-8574.
- Environment, B.C.M.o. 2008. *Guidelines for air quality dispersion modelling in British Columbia*. British Columbia Ministry of Environments: Victoria, British Columbia.
- Fonseca Hernández, M. 2013. Estudio del impacto en la calidad del aire de las fuentes puntuales en la ciudad de Pinar del Río. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 1, 01-12.
- Farr, T. G., et al., 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Journay Geophysics*, 45, 10-29.
- Fox, T. 2012. *Documentation of the Evaluation of Calpuff and Other Long Range Transort Models Using Tracer Experiment Data*. Air Quality Modeling Group, US EPA: ENVIRON International Corporation.
- Liu, M.K. y M. A. Yocke. 1980. Siting of wind turbine generators in complex terrain. *Journal Energy*, 4, 10-16.
- Mayor, Y. G. 2009. *Estudio preliminar de la efectividad potencial de los generadores terrestres de yoduro de plata en Cuba*. Licenciatura, Facultad de Gestión de la Ciencia la Tecnología y el Medio Ambiente, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas.
- Pielke, R.A. 1984. *Mesoscale Meteorological Modeling*. Academic Press, Orlando.
- Russell, A., Dennis, R., 2000. NARSTO critical review of photochemical models and modelling. *Atmospheric Environment*, 34, 2283-2324.
- Scire, J.S., et al. 2000a. *A User's Guide for the CALMET meteorological Model (Version 5)*. TRC Environmental Corporation.
- Scire, J.S., et al. 2000b. *A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model (Version 5.0)*. TRC Environmental Corporation.
- Stauffer, D. R. y Seaman, N. L. 1990. Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I: Experiments with synoptic-scale data. *Monthly Weather Review*, 118, 1250-1277.
- Taylor, K.E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal Geophysics Research*, 106, 7183-7192.
- US EPA. 2009. *Clarification on EPA-FLM Recommended Settings for CALMET*. Air Quality Modeling Group, US EPA: ENVIRON International Corporation.
- Willmott, C.J., et al. 1985. Statistics for the evaluation of model performance. *Journal of Geophysical Research*, 90, 8995 - 9005.

**Acerca de los autores:**

**Mariam Fonseca Hernández.** Licenciada en Meteorología y Aspirante a Investigador. Perteneció al consejo científico, con cuatro años de experiencia laboral como Especialista en Meteorología del Centro de Contaminación y Química Atmosférica del Instituto de Meteorología. Activa participación en proyectos de investigación nacionales y de colaboración extranjera. Temas de investigación son: la modelación numérica de la dispersión de contaminantes y mecanismos químicos de la atmósfera. A recibido cursos en el extranjero (sobre gases reactivos (Alemania)) y nacionales (idioma inglés y un diplomado en Física de la Atmósfera) los cuales tributan a la Maestría en Ciencias Meteorológicas que actualmente cursa.

**Yandy González Mayor.** Licenciado en Meteorología, 29 años de edad. Cinco años de experiencia laboral como Especialista en Meteorología del Centro de Física de la Atmósfera del Instituto de Meteorología. Activa participación en proyectos de investigación nacionales y de colaboración extranjera. Temas de investigación son: la modelación numérica de los procesos de formación de las precipitaciones y la simulación de la dispersión de contaminantes. A recibido cursos en el extranjero (sobre ciclones tropicales (en México)) y nacionales (idioma inglés y un diplomado en Física de la Atmósfera) los cuales tributan a la Maestría en Ciencias Meteorológicas que actualmente cursa.

**Ana Carla Fernández Valdés.** Licenciada en Meteorología, 23 años de edad. Recién graduada. Tributo a esta investigación en su investigación de tesis de grado. Trabaja en la Agencia del Medio Ambiente (AMA).

**Oswaldo Cuesta Santos.** DrC. en Ciencias Meteorológicas, Meteorólogo, Licenciado en Geografía. Dirige el Centro de Estudios sobre Contaminación y Química Atmosférica del Instituto de Meteorología de Cuba, es Investigador y Profesor Titular. Perteneció a los consejos científicos del Instituto de Meteorología y el de la Facultad de Medio Ambiente del Instituto Superior de Tecnología y Ciencias Aplicadas (InSTEC). Es miembro del grupo de expertos de diversos programas nacionales científico técnico, de la comisión de carrera y la maestría en Ciencias Meteorológicas, de la Sociedad Meteorológica de Cuba y la de Geografía, del Consejo Editorial de la Revista Cubana de Meteorología y árbitro en varias revistas científicas nacionales.