

Estudio de sensibilidad de parametrizaciones de capa límite para el pronóstico numérico de eventos de niebla/neblina para el Aeropuerto Internacional “José Martí” de La Habana



<https://cu-id.com/2377/v28n4e05>

Sensitivity study of boundary layer parametrizations for fog/haze events numerical forecasts on José Martí International Airport from Havana

 Pedro M. González Jardines^{1*},  Yisney Quiñones Trujillo²,  Arlett Díaz Zurita³

¹Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, Casablanca, Habana, Cuba.

²Centro Nacional de Pronóstico, Instituto de Meteorología, Casablanca, La Habana, Cuba.

³Aeropuerto Internacional José Martí, Boyeros Ave, Habana, Cuba.

RESUMEN: En la presente investigación se realiza un análisis de sensibilidad de cuatro parametrizaciones de Capa Límite Planetaria (PBL) utilizados en la simulación de un evento de niebla densa ocurrido el 4 de enero de 2019 en el Aeropuerto Internacional “José Martí” de La Habana. Para ello, en primer lugar, se evalúa el rendimiento de diferentes algoritmos que estiman la visibilidad horizontal para seleccionar el más óptimo para el área de estudio. En segundo lugar, se estudia el comportamiento de dicho algoritmo y un grupo de variables meteorológicas relacionadas con eventos de niebla/neblina con los diferentes esquemas de PBL. El análisis conduce a que los algoritmos relacionados con la depresión del punto de rocío, presentaron los mejores resultados, con índices de detección crítica de 0.75. Todos los esquemas de PBL en el horario de ocurrencia del evento subestimaron los valores de humedad relativa en aproximadamente 2 y 10 %, sobreestimaron la temperatura del punto de rocío y la temperatura del aire en rangos aproximados de 0.5-2.5 °C y de 0.5-3.5 °C respectivamente, así como la velocidad del viento entre 2 y 3 m/s. La parametrización de PBL más consistente con la realidad observada fue ACM2, presentando los menores errores estadísticos y un índice de detección crítica de 0.87. Esto sugiere una mejor representación de los procesos físicos que ocurren en la PBL y por tanto una mayor habilidad en la predicción y pronóstico de eventos de niebla/neblina en el área de estudio.

Palabras clave: PBL, niebla, neblina, visibilidad, algoritmos, WRF.

ABSTRACT: In this research a sensitivity analysis of four Planetary Boundary Layer (PBL) parametrizations used in the simulation of a dense fog event that occurred on January 4th, 2019 at the José Martí International Airport is carried out. At the first place the performance of different algorithms that estimate the horizontal visibility is evaluated for to select the more optimal over the study area. At the second place is evaluated the behavior of the selected algorithm and meteorological variables related with fog/haze events with the different PBL schemes. The analysis leads to the fact that the algorithms related with dew point depression presented the best results with a critical detection index (CSI) of 0.75. All PBL schemes at the time of occurrence of the event underestimated the relative humidity in a threshold of 2 - 10%, overestimated the dew point and temperature values in a threshold of 0.5 - 3.5 °C and 0.5 - 2.5 °C respectively, as well as the wind speed between 2 - 3 m/s values. The more realistic PBL parametrization was ACM2, presenting the lowest statistical errors and a CSI of 0.87. This suggests a better representation of the physical processes that occur in the PBL and therefore a greater ability in fog/haze events forecasting over the airport.

Key words: PBL, fog, haze, visibility, algorithm, WRF.

1. INTRODUCCIÓN

La posibilidad de pronosticar situaciones meteorológicas extremas se ha convertido en una herramienta muy útil para poder anticiparse a posibles problemáticas que puedan afectar la gestión del tráfico aéreo, constituyendo el pronóstico meteorológico una pieza clave a la hora de la toma de

decisiones. Varios y de diverso origen son los fenómenos capaces de poner en peligro la seguridad aérea, siendo la reducción de la visibilidad horizontal uno de ellos (Díaz, 2019). De hecho, los accidentes aéreos debido a problemas de visibilidad representan aproximadamente el 15% del total, aunque a partir de la década del 80 ha habido un fuerte descenso de casos (Moreno & Gil, 2003).

*Autor para correspondencia: Pedro M. González Jardines. E-mail: pedro.met90@gmail.com

Recibido: 20/02/2021

Aceptado: 15/09/2022

La visibilidad puede variar, desde nula, que corresponde a la niebla densa, a máxima, en la cual son visibles todos los objetos a cualquier distancia. Una de las principales causas de visibilidad reducida cerca de la superficie es la formación de nieblas y neblinas. Estos fenómenos afectan de forma directa a las operaciones aéreas, fundamentalmente en el despegue y el aterrizaje, por lo que resulta indispensable su adecuada vigilancia y pronóstico.

La formación y evolución de la niebla depende del comportamiento de los procesos de microescala que ocurren en la Capa Límite Planetaria (PBL; con las siglas en inglés). Para predecir correctamente su presencia a partir de los Modelos de Pronóstico Numérico del Tiempo (MPNT) se hace necesario una buena representación de la mezcla vertical, flujos de calor, humedad y momento, que determinan la capacidad del modelo para su representación (Chaouch *et al.*, 2017). Estos procesos que ocurren a una escala inferior a la rejilla del modelo se representan a partir de las parametrizaciones de PBL.

En particular, el modelo Weather Research and Forecasting (WRF) se ha utilizado para investigar la sensibilidad de diferentes parametrizaciones de PBL en la simulación de eventos de niebla. (Román-Cascón, 2012) obtiene un mejor rendimiento con MYNN (Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino nivel 2.5) que con QNSE (Quasi-Normal Scale Elimination) y MYJ (Mellor Yamada Janic) al simular niebla sobre la meseta norte de la Península Ibérica con el WRF. Esto contrasta con (de Paula *et al.*, 2017) quienes obtienen que MYJ es más efectivo para reproducir numéricamente un evento de niebla persistente en Santa María, Río Grande do Sul, Brasil.

Por otro lado (Lin *et al.*, 2017) investigaron la sensibilidad de diferentes esquemas de parametrizaciones físicas en la simulación numérica de un evento de niebla de advección sobre el Aeropuerto Internacional de Shanghai Pudong, en dicho estudio concluyeron que los esquemas YSU (Yonsei University) y ACM2 (Asymmetric Convective Model version 2) pueden generar simulaciones relativamente precisas. Sin embargo, muchos de estos autores coinciden en afirmar que cuando se estudia la sensibilidad de esquemas de PBL suelen encontrarse desempeños diferentes e inconsistencias, lo cual indica que las conclusiones son específicas para cada lugar (Román-Cascón, 2012; Steeneveld *et al.*, 2015).

Cuba, por su ubicación geográfica no puede clasificarse dentro de las áreas de mayor ocurrencia de niebla a nivel mundial. Sin embargo, dada su configuración e interrelación entre sistemas sinópticos y los factores físico-geográficos, se ve afectada con regularidad por nieblas que, si bien no alcanzan niveles alarmantes, si inciden en determinadas actividades como la aviación (Entenza, 2006).

Estudios nacionales indican que las nieblas se producen durante la madrugada y se extienden hasta las

primeras horas de la mañana en dependencia de la profundidad de la capa de inversión próxima a la superficie y del comportamiento de otras variables como la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del viento, bajo la influencia de determinadas situaciones sinópticas como el desplazamiento de los frentes fríos sobre el Golfo de México (Sosa *et al.*, 1992).

A pesar del impacto negativo que representa la niebla para la aviación, a nivel nacional esta temática ha sido poco estudiada. (Entenza, 2006) determina la relación entre la ocurrencia de la niebla en el Aeropuerto Internacional “José Martí” de La Habana (MUHA) y los factores de orden físico, local y sinóptico, así como el comportamiento del tiempo presente y algunas variables meteorológicas que determinan su formación. (Grillo, 2013), en una investigación muy similar, relaciona la ocurrencia de niebla en el MUHA con una serie de variables y eventos meteorológicos. Estos estudios tienen la desventaja de ser predominantemente estadístico-descriptivos y no resultan suficientes para confeccionar un pronóstico de visibilidad horizontal que permita hacer predicciones deterministas y sirvan de guía a los especialistas que allí laboran.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Área de estudio

El MUHA se encuentra ubicado al suroeste de la provincia de La Habana, a unos 13 km de la costa norte, en los 22.989° de latitud Norte y los -82.409° de longitud Oeste. Posee una altura sobre el nivel medio del mar del orden de los 64 m. La instalación tiene una única pista de 4 km de longitud, orientada en dirección SW-NE (AIP, 2014). El aeropuerto se ubica en una depresión acotada por la curva de 70 m, llegando cerca de 50 m en sus partes más bajas. Hacia el sudeste de la instalación se localizan elevaciones que oscilan entre los 100 y 120 metros, formando en el entorno terrestre la depresión Lacustre de Ariguanabo (Grillo, 2013).

Resultan de interés los sistemas de vientos locales; ya que, el área que circunda la instalación presenta condiciones en el terreno que permiten que desde las alturas del Cacahual y Bejucal, ubicadas al sur, exista un flujo catabático de aire frío y húmedo que favorece un enfriamiento muy marcado, de ahí que bajo condiciones que deriven en la combinación de vientos relativamente débiles y fuerte irradiación nocturna es muy probable la aparición de nieblas. (Grillo, 2013).

2.2 Configuración del modelo

Se emplea el modelo WRF-ARW en su versión 3.9, operativo de forma experimental en el Centro Meteorológico Provincial Habana-Artemisa-Mayabeque. Se trabaja con la inicialización de las 0000 UTC, empleando como condiciones iniciales y de frontera el modelo Global Forecast System (GFS), con 0.5° de resolución espacial y un intervalo temporal de 3 horas, para un plazo de 54 horas de pronóstico.

En las corridas se utilizaron dos dominios anidados bidireccionalmente con resoluciones horizontales de 12 km (kilómetros), con 256 x 204 puntos y de 4 km, con 103 x 94 puntos (figura 2.1). Para el estudio se seleccionó el dominio de mayor resolución espacial, que además cuenta con salidas que se imprimen en intervalos temporales de 1 hora.

Las parametrizaciones físicas empleadas se muestran en la tabla 2.1. Dicha configuración se basa en el Uso Avanzado del WRF y Buenas Prácticas (https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/best_practices.html), así como en las evaluaciones de sensibilidad realizadas al Sistema de Predicción Numérica Océano-Atmósfera (SPNOA) (Pérez et al., 2014) y al Sistema de Pronóstico Inmediato (SisPi) (Sierra et al., 2014).

Con el objetivo de evaluar la sensibilidad de diferentes esquemas de parametrizaciones de PBL en el pronóstico de eventos de niebla/neblina en el área de estudio, se probaron cuatro esquemas de PBL, dos de ellos de cierre local: MYJ y MYNN, uno de cierre no local: YSU y uno híbrido local-no local: ACM2. De estas cuatro parametrizaciones, tres se vincularon a los esquemas de frontera superficial (SL) MM5 y ETA, que se basan en la teoría Monin-Obukhov y uno, ACM2, usa su propio esquema de SL.

2.3 Algoritmos que estiman la visibilidad horizontal

Como se expresó con anterioridad, un grupo de algoritmos que permiten estimar la visibilidad horizontal serán sometidos a evaluación con el propósito de encontrar el más adecuado que permita generar un

pronóstico determinístico, el cual pueda ser evaluado con los diferentes esquemas de PBL.

Uno de los algoritmos empleados es el propuesto por (Stoelinga & Warner, 1999); (ecuación 1).

$$SW99 = \frac{-\ln(0.02)}{B}$$

Donde:

$$B = B_{cw} + B_{rw} + B_{ci} + B_{sn} \quad (1)$$

$$B_{(cw)} = 144.7(C_{(cw)})^{0.88} B_{(rw)} = 1.1(C_{(rw)})^{0.75} \quad (1.1)$$

$$B_{(ci)} = 163.9C_{(ci)} B_{(sn)} = 10.4(C_{(sn)})^{0.78} \quad (1.2)$$

Donde B es el coeficiente de extinción de la luz (km^{-1}), y se asocia con la concentración de masa C ($\frac{g}{m^3}$), que corresponde a diferentes especies de hidrometeoros (agua líquida, lluvia, nieve, hielo).

El UPP (Unified Post-procesor), considera un algoritmo muy similar al reflejado en la (ecuación 1). Sin embargo, difiere de este pues presenta pequeñas variaciones en los coeficientes estáticos asociados a las concentraciones de las diferentes especies de hidrometeoros, además que toma en cuenta las concentraciones de graupel, como puede observarse en la (ecuación 2.2).

$$UPP = \frac{-\ln(0.02)}{B_{UPP}}$$

Donde:

$$B = B_{cw} + B_{rw} + B_{ci} + B_{sn} + B_{gp} \quad (2)$$

$$B_{(rw)} = 2.24(C_{(rw)})^{0.75} B_{(ci)} = 327.8C_{(ci)} \quad (2.1)$$

$$B_{(sn)} = 10.36(C_{(sn)})^{0.7776} B_{(gp)} = 4(C_{(gp)})^{0.75} \quad (2.2)$$

Otro que emplea la variación de diferentes especies de hidrometeoros, pero combinándola con fluctuacio-

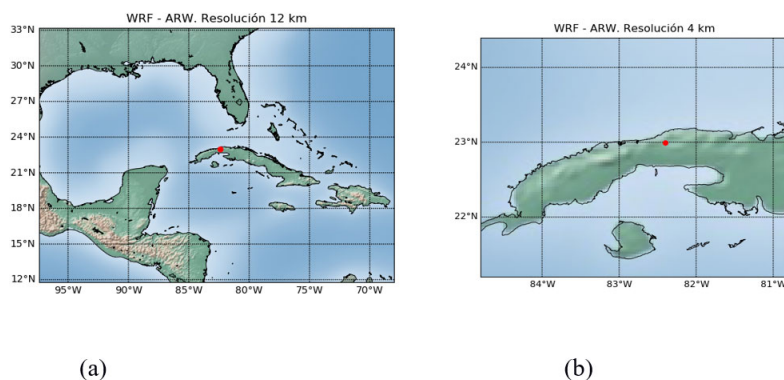


Figura 2.1. Dominios empleados en la investigación. (a) 12 km; (b) 4 km. El punto rojo indica la posición del MUHA.

Tabla 2.1. Descripción de algunas configuraciones físicas empleadas en la investigación.

Propiedades	Parametrización
Microfísica	WSM6 (WRF Single-moment 6-class)
Cúmulos	Grell-Freitas
Radiación de onda larga	RRTM (Rapid Radiative Transfer Model)
Radiación de onda corta	Dudhia
Frontera superficial	Pleim-Xiu, MM5 simility, Monin-Obukhov (Jánic Eta)
Modelo de superficie	Noah Land Surface Model
PBL	ACM2, YSU, MYJ, MYNN

nes de la humedad relativa (rh) y la razón de mezcla (mix) próximas a la superficie es el empleado por la AFWA (Air Force Weather Agency), (Creighton *et al.*, 2014)

$$AFWA_{metros} = \min(Vis_{niebla}, Vis_{hidrometeoros}, Vis_{polvo}) \quad (3)$$

$$Vis_{niebla} = 1500 * (105 * rh) * \left(\frac{5}{mix}\right) \quad (3.1)$$

$$Vis_{hidrometeoros} = \frac{-\ln(0.02)}{1.1 \left((C_r + C_g)^{0.75} \right) + 10.36 C_n^{0.78}} \quad (3.2)$$

En este caso no se toma en cuenta la reducción de la visibilidad debido al polvo puesto que para ello el WRF debe tener acoplado el módulo CHEM (Chemical), lo cual no se hizo para esta investigación.

El algoritmo empleado en el modelo RUC (Rapid Update Cycle) también fue considerado en este estudio. En este caso, el mismo considera el mayor valor de humedad relativa entre los dos niveles, de la configuración del modelo, más próximos a la superficie, asumiendo una relación exponencial entre la visibilidad y la humedad relativa (ecuación 4).

$$Vis_{RUC} = 60 * e^{-2.5 * qrh} \quad (4)$$

$$qrh = \min\left(0.8, \frac{rh_{max}}{100} - 0.15\right) \quad (4.1)$$

También empleando la humedad relativa, pero en combinación con la depresión del punto de rocío, se estudia la habilidad del algoritmo diseñado por el FSL (Forecast System Laboratory); (ecuación 5). Algunos autores obtienen buenos resultados con la aplicación de esta relación, sin embargo, plantean que su principal dificultad radica en que las detecciones correctas se logran a costa de un incremento en las falsas alarmas (Bang *et al.*, 2009; Lin *et al.*, 2017).

$$Vis_{FSL} = 1.609 * 6000 * \left(\frac{T - T_d}{rh^{1.75}}\right) \quad (5)$$

El coeficiente 1.609 se emplea para la conversión de millas a kilómetros.

Finalmente, y con un enfoque combinado de los métodos propuestos en la (ecuación 1) y (ecuación 5) se considera C_{vis} (Combined Visibility), (Bang *et al.*, 2009; Lin *et al.*, 2017). Esta propuesta se basa en calcular simultáneamente los dos métodos y luego seleccionar la visibilidad más baja (ecuación 6).

$$C_{vis} = \min(SW_{99}, Vis_{FSL}) \quad (6)$$

2.4 Parametrizaciones de PBL

Los esquemas de PBL abordan el problema de parametrizar la capa turbulenta que se desarrolla sobre la Tierra debido al calentamiento de la superficie, la cizalladura del viento y la fricción (García-Díez *et al.*, 2013). En la (tabla 2.2) se presentan algunas características resumidas de los esquemas empleados en la presente investigación.

De la tabla 2.2 se considera oportuno aclarar que se corresponde al número de Richardson bulk que excede cierto valor crítico; mientras que TKE se corresponde a la Energía Cinética Turbulenta.

2.4.1 Parametrización YSU (Yonsei University)

YSU es un esquema de cierre de primer orden, que considera los flujos no locales implícitamente a través de la parametrización del término no local. Fue propuesto por (Hong *et al.*, 2006). En la escala de la subcuadrícula, los flujos turbulentos se parametrizan utilizando variables de pronóstico C (viento zonal u, viento meridional v, temperatura potencial θ , humedad específica q) a partir de la ecuación de difusividad turbulenta, con un término adicional de contra-gradiente que incorpora la contribución de grandes turbulencias al flujo total.

EL esquema aumenta la mezcla en la flotabilidad impulsada y la disminuye en la mecánica. Sin embargo, se ha demostrado que profundiza demasiado la PBL para entornos convectivos profundos en primavera. Esto da como resultado demasiado aire seco cerca de la superficie y subestimación de la energía convectiva potencial disponible de la capa media relacionada con la convección profunda (Coniglio *et al.*, 2013).

2.4.2 Parametrización ACM2 (Asimetric Convective Model version 2)

El nuevo ACM2 (Pleim, 2007) es un esquema de primer orden que combina la aproximación no-local para la mezcla ascendente y local para la descendente. Los flujos ascendentes dentro de la CBL (Convective Boundary Layer; siglas en inglés), se representan como interacciones entre la SL y cada capa superior

Tabla 2.2. Principales características de los esquemas utilizados en la investigación.

Esquema de PBL	Orden de cierre	HPBL	Límite
YSU	1.0 no-local	R_{ib}	$\frac{0}{0.25}$
ACM2	1.0 híbrido local - no-local	R_{ib}	0.25
MYJ	1.5 local	TKE	$\frac{0.2}{s^2}$
MYNN 2.5	1.5 local	TKE	$1 * 10^{-6} \frac{m^2}{s^2}$

(incluida la difusión local de remolinos), mientras que los descendentes van de una capa a la siguiente inmediatamente subyacente (Cohen *et al.*, 2015).

El esquema proporciona una solución simple al problema de modelar el transporte turbulento a pequeña y gran escala dentro de la CBL. En relación con la mezcla vertical, los perfiles de temperatura potencial y velocidad del viento en la PBL obtenidos utilizando el esquema ACM2, son más precisos teniendo en cuenta los puntos de vista locales y no locales (Pleim, 2007). Sin embargo, (Coniglio *et al.*, 2013) compararon las simulaciones de CBL utilizando ACM2 con sondeos nocturnos y descubrieron que el esquema sobreestima la profundidad de la CBL en condiciones de convección profunda.

2.4.3 Parametrización MYJ (Mellor Yamada Janic)

MYJ es un esquema TKE basado en una aproximación de mezcla local. MYJ utiliza el modelo de cierre de (Mellor & Yamada, 1982) para representar la turbulencia por encima de SL (Hu *et al.*, 2010). Este esquema resuelve la ecuación pronóstica de TKE y determina el coeficiente de difusividad turbulenta a partir de una función que incorpora la longitud de mezcla, la cizalladura vertical y el impulso (LeMone *et al.*, 2012).

El esquema es apropiado para todos los flujos estables y ligeramente inestables, siendo los errores más probables a medida que el flujo se acerca al límite de convección libre (Avolio *et al.*, 2017). En este sentido (Coniglio *et al.*, 2013) mostraron que el esquema subestima la profundidad de la capa de mezcla para regiones de fuerte convección.

2.4.4 Parametrización MYNN 2.5 (Mellor Yamada Nakanishi and Niino 2.5)

El MYNN es un esquema de cierre local de 1.5 orden propuesto por (Nakanishi & Niino, 2006). Una de sus principales características es que las expresiones de estabilidad y longitud de mezcla se basan en resultados de simulaciones usando un modelo LES (Large Eddy Simulation) en lugar de compararla con las observaciones (Avolio *et al.*, 2017), con el fin de superar problemas detectados en otros esquemas de tipo Mellor-Yamada, como un crecimiento lento de la CBL y la subestimación de la TKE (Banks *et al.*, 2016).

MYNN mejora la representación de la CBL, incluso en condiciones de convección profunda (Coniglio *et*

al., 2013). Sin embargo, no consigue representar completamente la mezcla vertical profunda asociada con remolinos más grandes y flujos de contra-gradiente (Cohen *et al.*, 2015).

2.5 Datos y verificación de resultados

Se utilizaron los datos reales de visibilidad y de tiempo presente de las observaciones de los informes METAR, disponibles en la base de datos del MUHA.

2.5.1 Estadígrafos de verificación

Se calculan diferentes estadígrafos con el objetivo de evaluar y verificar los resultados. Para ello se adopta la notación empleada por (Jolliffe & Stephenson, 2003), donde y_i representa el valor pronosticado y x_i el valor observado en el momento i .

De esta forma se obtiene el Bias que proporciona la media de la diferencia entre el valor pronosticado y el valor real (ecuación 7)

$$ME = \frac{1}{N} \sum (y_i - x_i) \quad (7)$$

Paralelamente se usa el índice de dispersión (SI, por sus siglas en inglés) expresa cuan dispersos están los valores pronosticados de los reales.

$$SI = \frac{RMSE}{n} \quad (8)$$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2$$

Donde RMSE representa la raíz del error cuadrático medio definida por la ecuación:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (y_i - x_i)^2} \quad (8.1)$$

2.5.2 Evaluación dicotómica

Muchos fenómenos meteorológicos pueden clasificarse como eventos binarios simples (dicotomía), quedando su presencia determinada por su ocurrencia o no y su pronóstico o aviso puede ser o no emitido, empleándose para ellos las tablas de contingencia (Jolliffe & Stephenson, 2003); (tabla 2.3).

A partir de los resultados de la tabla fueron calculados la probabilidad de acierto (POD), la probabilidad de falsas alarmas (PODF) y el índice de detección crítica (CSI). Estos estadígrafos permiten evaluar la habilidad del pronóstico (ecuación 8).

$$POD = \frac{a}{a+c} \quad PODF = \frac{b}{b+d} \quad CSI = \frac{a}{a+b+c} \quad (9)$$

Tabla 2.3. Tabla de contingencia

Pronóstico	Observación	
	Si	No
Si	Correcto (a)	Falsa alarma (b)
No	Incorrecto (c)	Correcto negativo (d)

3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Situación sinóptica

Sobre el país se observa la influencia de la periferia del anticiclón que se extiende por aguas del Atlántico occidental sobre el archipiélago cubano, con débiles gradientes de presión y vientos débiles con un flujo medio del segundo cuadrante (figura 3.1). Esta configuración ha sido identificada por varios autores nacionales (Alfonso & Florido, 1993; Entenza, 2006; Álvarez *et al.*, 2011; Grillo, 2013) como favorable para la aparición de eventos de niebla/neblina sobre la región occidental del país. Esto se debe fundamentalmente a que la subsidencia generada por el anticiclón limita el ascenso del calor acumulado durante el día hasta las capas bajas, generando una inversión de temperatura en las mismas, así como suficiente enfriamiento superficial como para permitir que la humedad se eleve y alcance la sobresaturación.

3.2 Comportamiento de los diferentes algoritmos en la estimación de la visibilidad horizontal.

Los diferentes algoritmos fueron aplicados a las salidas del WRF. La evaluación de los mismos en aras de seleccionar el de mejor desempeño fue hecha sobre la configuración original del modelo, que utiliza la parametrización de PBL MYJ. Esto persigue el propósito de evaluar posteriormente la reacción de dicho algoritmo ante los otros esquemas de PBL. Los resultados son mostrados en el lapso de las primeras 24 horas de simulación ya que el análisis se centra en la ocurrencia del fenómeno objeto de estudio.

El resultado de la aplicación de dichos algoritmos indica que ninguno de los propuestos fue capaz de representar correctamente el evento de niebla densa ocurrido entre las 10:00 y 13:00 UTC del día 4 (figura 3.2a). Aquellos que están basados exclusivamente en el coeficiente de extinción obtenido a partir de diferentes especies de hidrometeoros (SW 99 y

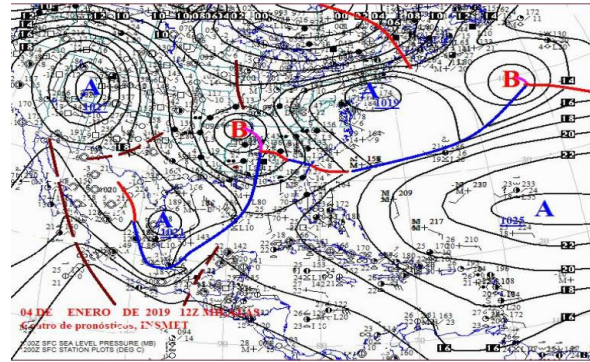


Figura 3.1. Situación sinóptica en superficie correspondiente al 04 de enero de 2019 a las 12:00 UTC. Mapa elaborado por el Centro Nacional de Pronóstico del Instituto de Meteorología.

UPP) muestran valores constantes superiores a los 20 km, lo cual indica que la relación propuesta por ellos resulta ineficiente en el caso analizado. Varias causas pueden incidir en estos resultados, una de ellas es la dificultad del modelo de predecir el contenido de agua líquida diferente de cero cerca de la superficie (Ryerson, 2012).

Los algoritmos RUC y AFWA, que calculan la visibilidad horizontal para la niebla/neblina a partir de los valores de humedad relativa, muestran resultados más precisos que los anteriores, siendo RUC ligeramente más realista; aunque no predice el evento de niebla. Estos resultados conducen a que las relaciones empíricas en ellos empleadas no responden adecuadamente sobre el área de estudio. Esto ha sido identificado también por otros autores, por ejemplo, (Bang *et al.*, 2009) plantean que a los coeficientes empíricos utilizados en los diferentes algoritmos estar basados en mediciones hechas sobre los Estados Unidos, estos pueden no representar adecuadamente las características físico-geográficas de otras regiones del planeta.

FSL resultó más eficiente en el pronóstico que el resto de los algoritmos, al predecir visibilidades horizontales inferiores a 5 km durante el período de aparición del fenómeno (fig 3.2), lo que muestra que el cálculo de la visibilidad horizontal en el aeródromo

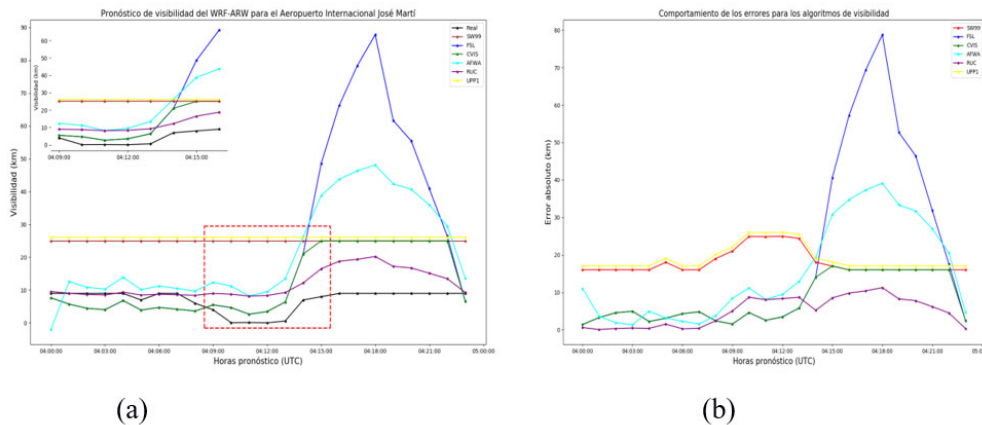


Figura 3.2. Comportamiento de los diferentes algoritmos propuestos durante las primeras 24 horas de pronóstico. (a) Pronóstico derivado del cálculo de los diferentes algoritmos; (b) Bias.

mejoró significativamente al incluir los valores de la depresión del punto de rocío. En este sentido, la filosofía de cálculo de Cvis, indica que esta relación también puede ser efectiva sobre el área de estudio, obteniendo ambas un bias muy similar en los instantes de aparición del fenómeno sobre el aeropuerto.

Siguiendo con este razonamiento, se encuentra que FSL y Cvis muestran la menor dispersión de los datos pronosticados respecto a los reales, al tomar valores de índice de dispersión inferiores a 0.1, con un aumento posterior a este horario, oscilando Cvis alrededor de 0.2, mientras que FSL alcanza un máximo a las 18:00 UTC superior a 1. En oposición UPP y SW 99 toman valores de índice de dispersión que oscilan entre 0.2 y 0.5, demostrándose que durante el período diurno ocurre la mayor dispersión de los algoritmos respecto los datos observados.

Estos resultados se sostienen por la metodología de medición de la visibilidad, que tiene un alto componente subjetivo. La causa principal se debe a que las estaciones convencionales miden la visibilidad horizontal a partir de un punto de referencia conocido, fijando una cota máxima de visibilidad, en el aeródromo la visibilidad horizontal máxima de interés es 10 km, en cambio el modelo no tiene en cuenta esta restricción.

Los resultados obtenidos por FSL y Cvis también están sustentados por la habilidad del MPNT para representar los campos meteorológicos involucrados en la formulación de dichos algoritmos. En este sentido se obtiene que el WRF tiende a subestimar los valores de humedad relativa cuando esta se aproxima a valores de

sobresaturación (fig 3.3a). Estos resultados coinciden con numerosos autores que reflejan resultados similares con el empleo de dicho modelo independientemente del diseño que empleen, tal es el caso de (Román Cascón, 2015; de Paula et al., 2017; Lin et al., 2017).

La depresión del punto de rocío pronosticada por el modelo estuvo en el rango de 1 a 1.5 °C, casi 1 °C por encima de lo registrado en la estación del aeródromo donde, de acuerdo con (Grillo, 2013), la mayor cantidad de reportes de niebla en la instalación ocurren con diferencias entre -1 y 1 °C. Estos resultados reflejan un ambiente más cálido pronosticado por el WRF (fig 3.3b) con lo cual la masa de aire aumenta su capacidad de retención de vapor de agua y le cuesta alcanzar el grado de sobresaturación necesario para la formación de la niebla, un hecho que puede haber influido en la subestimación de la intensidad del fenómeno presente en FSL y Cvis.

El análisis dicotómico hecho con los algoritmos, cuyos resultados se reflejan en la (tabla 3.1), resulta concluyente para identificar a FSL y Cvis como los de mayor habilidad sobre el área de estudio. La ausencia de falsas alarmas se debe a que el evento pronosticado fue de menor extensión temporal en comparación con las observaciones.

3.3 Evaluación de las parametrizaciones de PBL

Dado que los resultados de FSL y Cvis son iguales y teniendo en cuenta que este último refleja de forma más ajustada el comportamiento diurno de la visibilidad horizontal, se decide emplear Cvis para la evaluación de los esquemas de PBL.

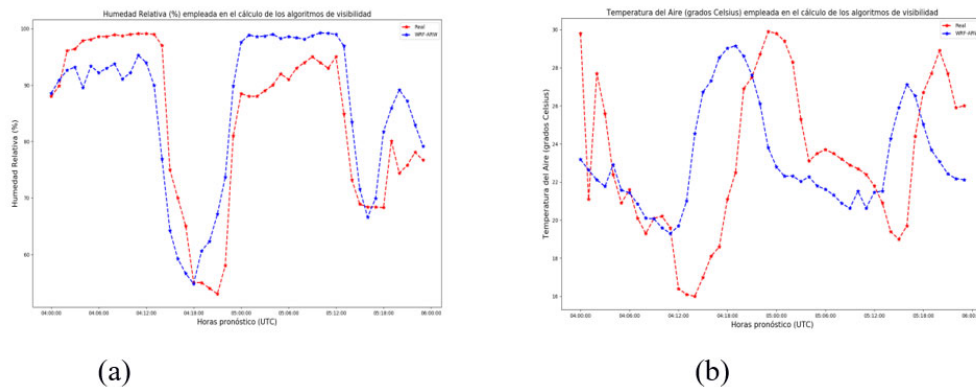


Figura 3.3. Relación entre las mediciones y el pronóstico e los campos de (a) humedad relativa y (b) temperatura sobre el aeródromo durante el período de simulación.

Tabla 3.1. Resumen del análisis dicotómico entre el pronóstico y la observación de la visibilidad horizontal sobre el aeródromo.

Algoritmos	24 horas de pronóstico		
	POD	PODF	CSI
SW ₉₉	0	0	0
FSL	0.75	0	0.75
Cvis	0.75	0	0.75
AFWA	0	0	0
RUC	0	0	0
UPP	0	0	0

Al aplicar dicho algoritmo con los esquemas de PBL seleccionados se observan pocas diferencias entre ellos, básicamente todas las parametrizaciones seleccionadas conducen a pronosticar un evento de neblina en lugar de uno de niebla densa, lo cual indica una marcada subestimación de la intensidad del fenómeno (figura 3.4). Sin embargo, ACM2 muestra un comportamiento un tanto diferente. Con dicho esquema Cvis reacciona pronosticando un evento de neblina moderada a fuerte en los horarios previos a la aparición del evento, alcanzando un mínimo de visibilidad en los instantes de mayor intensidad del episodio, sugiriendo una niebla ligera, en lugar de neblina como el resto de las parametrizaciones (MYJ-YSU-MYNN). A pesar de ello pronostica una dispersión temprana del evento, algo en lo que coinciden todos los esquemas de PBL.

Como se vio con anterioridad, en estos resultados influye como los diferentes esquemas de PBL representan el ambiente sinóptico bajo el cual pudiera desarrollarse un episodio de niebla/neblina. Esta sentencia involucra variables como la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, cuya caracterización en eventos de niebla ha sido descrita por varios autores nacionales (Entenza, 2006; Maura, 2008; Hernández et al., 2017).

En este sentido, se obtuvo que todos los esquemas subestimaron la humedad relativa, en el entorno del 2-5%, cuando esta se aproxima a valores de sobresaturación, coincidiendo con los resultados de (Román-Cascón, 2012; de Paula et al., 2017); una diferencia que resultó ser máxima en el horario de las 13:00 UTC, donde la subestimación alcanzó valores cercanos al 10% (figura 3.5a). Se puede observar cómo ACM2 fue el esquema que presentó un comportamiento más realista reduciendo dicha subestimación, pero no consigue alcanzar la sobresaturación, mientras que el resto presenta diferencias poco significativas entre sí en relación a los pronósticos.

Estos resultados se encuentran estrechamente ligados con la presencia de ambientes más cálidos reproducidos por el modelo, donde las diferencias oscilaron entre 0.5 y 2.5 °C, para el caso de la temperatura ambiente (figura 3.5c) y de 0.5 a 3.5 °C, en relación con la temperatura del punto de rocío (figura 3.5d). Nuevamente ACM2 reproduce de forma más realista el comportamiento de la temperatura, aunque su tasa de enfriamiento superficial es menor que la real. El resto de los esquemas incluso pronostican un calentamiento de la superficie en el entorno de las 03:00 UTC que no se corresponde con las mediciones e incrementa el error de pronóstico de la temperatura nocturna ya que, al igual que ACM2, la tasa de enfriamiento es inferior a la real. Estos resultados coinciden con autores como (Bergot & Guedalia, 1993; Román-Cascón, 2012; Lin et al., 2017; de Paula et al., 2017), quienes obtienen igualmente que los modelos numéricos muestran cierta tendencia a sobreestimar esta variable en ambientes nocturnos.

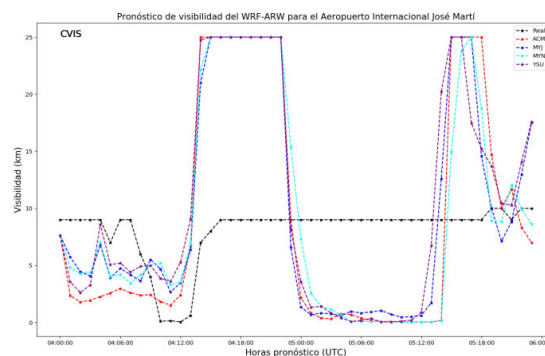


Figura 3.4. Comportamiento de las parametrizaciones de PBL (curva de colores) en el cálculo de la visibilidad horizontal, utilizando el algoritmo de visibilidad CVIS, respecto al valor real (curva negra).

Los valores de fuerza del viento fueron sobreestimados en entornos de 2-3 m/s, lo que representó el punto más bajo de las simulaciones. Específicamente los esquemas MYJ y ACM2 fueron los que presentaron errores ligeramente inferiores al resto, pero con sobreestimaciones medias de 2 m/s en los horarios de mayor intensidad del evento cuando el viento estaba prácticamente en calma. Estas velocidades pueden tener influencia en la presencia de ambientes más cálidos dado que pueden inhibir o disminuir la tasa de enfriamiento radiativo. Por otro lado, una mayor fuerza del viento aumenta la mezcla turbulenta con la consecuente intrusión de aire seco proveniente de niveles próximos a la superficie, erosionando la inversión térmica y generando ambientes hostiles para los fenómenos objeto de estudio.

Este razonamiento puede observarse con la construcción de cortes verticales para los primeros 1000 metros desde la superficie empleando las salidas del WRF con las diferentes parametrizaciones (figura 3.6). Se observa una erosión en la inversión térmica en el horario del evento de niebla, relacionada con incrementos en la velocidad del viento en el entorno de las 07:00 UTC, lo que se traduce en un debilitamiento del gradiente de esta capa asociado a la presencia de mezcla turbulenta.

El corte del esquema YSU (figura 3.6a), se observan los menores valores de humedad relativa en superficie, posiblemente relacionados con la menor tasa de enfriamiento radiativo, presentando para las 12:00 UTC valores de temperatura entre 22 y 22.5 °C (la mayor para este horario), lo cual se correlaciona con la disipación más rápida pronosticada por Cvis.

Por otro lado, MYJ y MYNN (figura 3.6c y 3.6d) muestran resultados más realistas en comparación con YSU, con una mayor tasa de enfriamiento en superficie a partir de las 09:00 UTC y mayores valores de humedad relativa, mostrando MYJ resultados ligeramente superiores y una inversión térmica más profunda, evidenciando que este esquema ofrece buenos resultados para situaciones de estabilidad (Avolio et al., 2017).

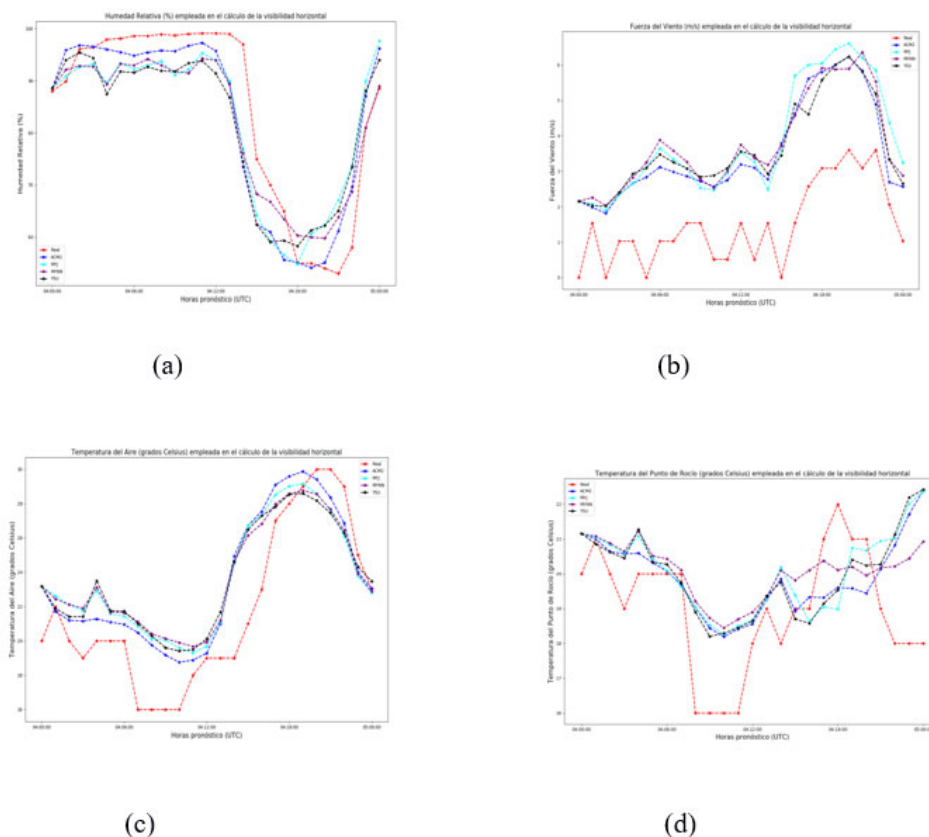


Figura 3.5. Evolución temporal (durante las primeras 24 horas de pronóstico) de las variables meteorológicas para los diferentes esquemas de parametrizaciones de PBL utilizados en la investigación. (a) humedad relativa-%; (b) velocidad del viento-m/s; (c) temperatura-°C y (d) temperatura del punto de rocío-°C.

Con ACM2 (figura 3.6b) se observa un enfriamiento superficial desde las 03:00 UTC, lo que se corresponde con la predicción de neblina sobre el aeródromo. Sobre las 09:00 UTC aumenta la tasa de enfriamiento radiativo, prediciendo a partir de este horario los mayores valores de humedad relativa comparado con los restantes esquemas y la mayor concentración de esta variable cercana a la superficie. El esquema muestra además la mayor duración temporal de la inversión, con un aumento del gradiente térmico para las 10:30 UTC, aunque no resultó suficiente como para establecer las condiciones de saturación en superficie necesarias para la formación de una niebla densa, mostró los resultados más consistentes con la realidad observada.

A modo de resumen puede plantearse que YSU muestra la menor habilidad en la representación del ambiente para la formación y evolución del fenómeno, lo que pudo corresponderse con la predicción de mayor mezcla turbulenta, un hecho relacionado con que este esquema utiliza un cierre no local, que al enfocarse principalmente en la representación de remolinos más grandes, se espera que funcione mejor en ambientes más inestables según (Penc et al., 2008).

De manera general los esquemas locales, MYJ y MYNN, presentaron desempeños similares y ligeramente más realistas que YSU. La causa principal pue-

de estar determinada a partir de que ambos emplean la ecuación de TKE en la parametrización de los flujos turbulentos. No obstante, igualmente se observa en ellos una importante sobreestimación de la velocidad del viento para estos fenómenos, con el incremento de la TKE a partir del aporte de origen mecánico también conducen a un incremento de la mezcla turbulenta lo cual desencadenó un evento más débil y fue un factor propicio para el pronóstico de disipaciones tempranas.

ACM2 presenta una ligera mejoría en la predicción de las variables meteorológicas analizadas respecto a los otros esquemas evaluados, lo que determina que haya representado de manera más precisa las características asociadas a los procesos físicos de PBL sobre el área de estudio para la predicción del evento. Al ser un esquema híbrido utiliza un factor de ponderación para determinar la parte de la mezcla debida al transporte local y no local donde, en condiciones de estabilidad, la parte de mezcla debida al transporte no local se establece en cero (Coniglio et al., 2013), además según (Pleim, 2007) los perfiles de velocidad del viento en la PBL se representan con mayor precisión cuando se consideran los puntos de vista locales y no locales con respecto a la mezcla vertical. Este resultado es similar a (Lin et al., 2017) quienes concluyen que ACM2 representa una buena opción en la predicción de una niebla, (de advección en el caso de los

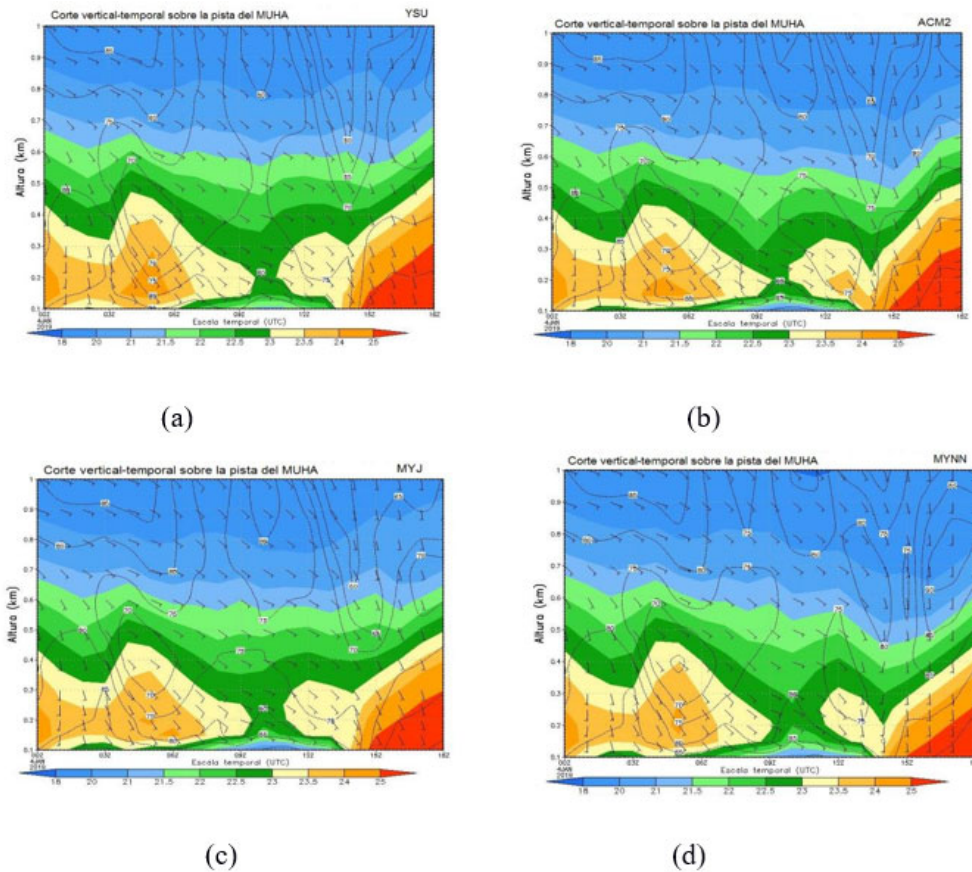


Figura 3.6. Cortes verticales de los primeros 1000 metros sobre el área de estudio para los distintos esquemas de PBL, que incluyen fuerza del viento viento (m/s) en vástagos, humedad relativa (%) en contornos y temperatura (°C) en sombreado.

Tabla 3.2. Resultado del análisis binario generado para los distintos esquemas de PBL con el algoritmo Cvis.

Parametrizaciones de PBL	24 horas de pronóstico		
	POD	PODF	CSI
ACM2	0.87	0	0.87
YSU	0.62	0	0.62
MYJ	0.75	0	0.75
MYNN 2.5	0.75	0	0.75

mencionados autores), lo que sugiere que el esquema es adecuado para la representación de estos fenómenos en independencia del mecanismo de formación.

A partir de la realización del análisis binario se corrobora que el esquema ACM2 muestra la mayor habilidad de pronóstico del evento sobre el aeródromo (tabla 3.2).

CONCLUSIONES

En la presente investigación se evaluó la habilidad de diferentes algoritmos y esquemas de PBL en la predicción de un evento de niebla densa sobre el MUHA.

Los resultados obtenidos indican que los algoritmos relacionados con la depresión del punto de rocío, FSL y Cvis, mostraron la mayor precisión en el pronóstico numérico de eventos de niebla/neblina sobre el área de estudio, con un índice de detección crítica de 0.75 durante la ocurrencia del evento.

Todos los esquemas de parametrizaciones de PBL presentaron dificultades para reflejar las condiciones de sobresaturación, lo cual se evidencia en las subestimaciones de humedad relativa en un umbral de 2 al 10 %, ocurridas fundamentalmente en los horarios de presencia del fenómeno. También se corrobora que conducen a pronósticos de temperatura superficial nocturna más cálidos en comparación con las observaciones, un hecho que ha sido descrito por autores foráneos y que conduce a ambientes con mayor capacidad de retención de vapor, lo cual dificulta alcanzar el estado de sobresaturación de la masa de aire. Dichas sobreestimaciones de temperatura se hallan en los umbrales de 0.5-2.5 °C, para el caso de la temperatura ambiente, y de 0.5 a 3.5 °C, para la temperatura del punto de rocío.

La fuerza del viento fue sobreestimada en rangos de 2 a 3 m/s, constituyendo este el punto más bajo de las simulaciones y generando ambientes hostiles por

concepto de mezcla turbulenta, una mayor erosión de la inversión térmica y contribuye a disminuir la tasa de enfriamiento radiativo. En este sentido, los peores resultados fueron obtenidos con YSU.

Esta investigación sugiere que el esquema de PBL que ofrece los resultados más realistas sobre el aeródromo fue ACM2, con un índice de detección crítica entre un 12 y un 25% superior al resto de las parametrizaciones.

Este constituye el primer estudio que relaciona las parametrizaciones de PBL con eventos de niebla/neblina. La ampliación de casos de estudio y la inclusión de otros horarios de inicialización de conjunto con técnicas de asimilación de datos permitirán construir herramientas más certeras para lograr una predicción más realista de estos fenómenos.

REFERENCIAS

- Alfonso A. P.; A. Florido (1993): El clima de Matanzas. Editorial Academia, La Habana, 113 pp.
- AIP, (2014). IACC. Publicación de Información Aeronáutica (AIP). Instituto de Aeronáutica Civil., 40 pp.
- Álvarez, E. L.; Borrajero, M. I.; Álvarez, M. R.; & León, L. A. (2011*). "Estudio de la marcha interanual de la frecuencia de ocurrencia de los fenómenos nieblas y neblinas a partir del código de estado de tiempo presente". Revista Ciencias de la Tierra y el Espacio, (12): 31-46, ISSN: 1729-3790
- Avolio, E. Federico; Miglietta, M. M.; Feudo, L. T.; Calidonna, C. R.; y Sempreviva, A. M. (2017). Sensitivity analysis of WRF model PBL schemes in simulating boundary-layer variables in southern Italy: An experimental campaign. Atmospheric Research.
- Bang, C. H.; Lee, J. W.; y Hong, S. Y. (2009). Predictability experiments of fog and visibility in local airports over Korea using the WRF model. Korean Soc. Atmos., Vol. 24:92-101 pp.
- Banks, R. F.; Tiana-Alsina, J.; Baldasano, J. M.; Rocadenbosch, F.; Papayannis, A.; Solomos, S.; Tzani, C. G. (2016). Sensitivity of boundary-layer variables to PBL schemes in the WRF model based on surface meteorological observations, lidar, and radiosondes during the HygrA-CD campaign. Atmospheric Research., 185-201 pp.
- Bergot T.; D. Guedalia (1993): Numerical Forecasting of Radiation Fog. Part I: Numerical Model and Sensitivity Tests. MWR, Vol. 122, No. 6, 12181230. DOI: [10.1175/1520-0493](https://doi.org/10.1175/1520-0493)
- Cohen, A. E.; Cavallo, S. M.; Coniglio, M. C.; and Brooks, H. E. (2015). A Review of Planetary Boundary Layer Parameterization Schemes and Their Sensitivity in Simulating Southeastern U.S. Cold Season Severe Weather Environments. Weather and Forecasting., Vol. 30:591-612 pp
- Coniglio, M. M.; Correia, J.; Marsh, P. T.; Kong, F. (2013). Verification of Convection-Allowing WRF Model Forecasts of the Planetary Boundary Layer Using Sounding Observations. American Meteorological Society, Vol 28:842-862 pp.
- Creighton G.; Kuchera E.; McCormick J.; Rentschler S.; Wickard B. (2014): AFWA Diagnostics in WRF. <https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/>
- de Paula, Nórton Franciscatto; Scremin Puhales, Franciano; Anabor, Vagner; Dal Piva, Everson; de Lima Nascimento, Ernani (2015): Mean weather characteristics associated to radiation fog at Santa Maria-RS. Ciência e Natura, Santa Maria v.37 n.3, 2015, Set.- Dez. p. 613 - 624 Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas - UFSM ISSN impressa: 0100-8307 ISSN on-line: 2179-460X. DOI:[10.5902/2179-460X17277](https://doi.org/10.5902/2179-460X17277).
- Díaz A.; Góngora C.; Lobaina A.; Pérez A.; Coll P. (2019): Pronóstico numérico del viento a mesoescala y a corto plazo para el Aeropuerto Internacional "Jose Martí" de La Habana. Revista Brasileira de Meteorología v. 36, n 1, pp 1-12 DOI: <https://dx.doi.org/10.1590/0102-77863610007>
- Entenza, L. T. (2006). Estudio Preliminar sobre la ocurrencia de niebla en el Aeropuerto Internacional "José Martí" de La Habana. Revista Cubana de Meteorología., Vol. 13 No. 1.
- García-Díez, M.; Fernández, J.; Fita, L.; Yagüe, C. (2013). Seasonal dependence of WRF model biases and sensitivity to PBL schemes over Europe. Royal Meteorological Society., Vol. 139.
- Grillo, N. G. (2013). La niebla en el Aeropuerto Internacional "José Martí", su relación con eventos y variables meteorológicas. Tesis en opción al título de Licenciatura en Meteorología. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. La Habana, Cuba. Consultado marzo/2020
- Hernández J. F.; González C. M.; González P. M. 2017. "Pronóstico de nieblas en las provincias de Artemisa, La Habana y Mayabeque". IX Congreso Cubano de Meteorología, La Habana, Cuba. ISBN: 978-959-7167-60-0. Avaliable: Sociedad Meteorológica de Cuba. Consultado: marzo/2020.
- Hong, S.-Y.; Noh, Y.; Dudhia, J. (2006). A New Vertical Diffusion Package with an Explicit Treatment of Entrainment Processes. Mon. Wea. Rev., Vol. 134.
- Hu, X.-M., Nielse Gammon, J. W., y Hang, F. (2010). Evaluation of Three Planetary Boundary Layer Schemes in the WRF Model. American Meteorological Society., Vol. 49:1831-1844 pp.
- Jolliffe, I. T. and Stephenson, D. B. (2003). Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science.
- LeMone, M. A., Tewari, M., Chen, F., y Duhia, J. (2012). Objectively Determined Fair-Weather CBL Depths in the ARW-WRF Model and Their Comparison to CASES-97 Observations. Monthly

- Weather Review. American Meteorological Society., Vol. 141:30-54 pp.
- Lin, C., Zhang, Z., Pu, Z., y Wang, F. (2017). Numerical Simulations of an Advection Fog Event over Shanghai Pudong International Airport with the WRF model. <https://www.researchgate.net/publication/320820726>, Vol. 31 No. 5:874-889pp.
- Maura L.; Rojas Y.; Carnesoltas M.; Rubio C.; Laborde N.; Perigó E.; Baza R. (2008): Comportamiento de la niebla en la provincia de Guantánamo
- Mellor, G. L. and Yamada, T. (1982). Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. Rev. Geophys. Space Phys., Vol. 20.
- Moreno, M. G. y Gil, M. A. (2003). Análisis de la siniestralidad aérea por causa meteorológica (1970-1999). Investigaciones Geográficas. Instituto Universitario de Geografía. Universidad de Alicante., Vol. 30:23 pp.
- Nakanishi, M. y Niino, H. (2006). An improved Mellor-Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog. Boundary-Layer Meteor., Vol. 119:397-407 pp.
- Penc, R. S., Smith, J. A., Raby, J. W., Dumias, R. E., Reen, B. P., y Dawson, L. P. (2008). Intercomparison of 7 Planetary Boundary-Layer/Surface-Layer Physics Schemes over Complex Terrain for Battlefield Situational Awareness. US Army Research Laboratory.
- Plaim, J. E. (2007). A Combined Local and Nonlocal Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. Part I: Model Description and Testing. Applied Meteorology and Climatology., Vol. 46:1383-1395 pp.
- Pérez, A.; Mitrani, I.; y Díaz, O. (2014). Sistema de Predicción Numérica Océano-Atmósfera para la República de Cuba. Informe de Resultado Científico. Instituto de Meteorología. Centro de Física de la Atmósfera. <https://modelos.insmet.cu/static/models/docs/>.
- Román-Cascón, C.; Yagüe C.; Sastre M.; Maqueda, G. (2012) : Observations and WRF simulations of fog events at the Spanish Northern Plateau. Adv. Sci.Res., 8, 11-18, doi: [10.5194/asr-8-11-2012](https://doi.org/10.5194/asr-8-11-2012).
- Ryerson William R. (2012): Toward improving short-range fog prediction in data-denied areas using the Air Force Agency Mesoscale Ensemble. <https://calhoun.nps.edu/handle/10945/17454>.
- Steenefeld, G. J., Ronda, R. J., y Holtslag, A. A. (2015). The challenge of forecasting the onset and development of radiation fog using mesoscale atmospheric models. Boundary-Layer Meteor. , Vol. 154:265-289 pp.
- Sierra M.; Ferrer A.; Hernández R.; González Y.; Cruz R.; Borrajero I.; Rodríguez C. (2014) Sistema de Predicción a muy corto plazo basado en el Acoplamiento de Modelos de Alta Resolución y Asimilación de Datos. Informe de resultado. Programa: "Meteorología y Desarrollo Sostenible del País". Instituto de Meteorología. DOI: [10.13140/RG.2.1.2888.1127](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2888.1127) <https://modelos.insmet.cu/static/models/docs/>.
- Sosa M.; O. Rodríguez; R. Hernández (1992): Las nieblas en las Provincias Habaneras. Revista Cubana de Meteorología, Vol. 5, No. 2, pp 28-34.
- Stoelinga, M. T., & Warner, T. T. (1999). Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an East Coast winter precipitation event. Journal of Applied meteorology, 38(4), 385-404.

Lic. Pedro M. González Jardines. Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, Casablanca, Habana, Cuba.

Lic. Yisney Quiñones Trujillo. Centro Nacional de Pronóstico, Instituto de Meteorología, Casablanca, La Habana, Cuba. E-mail: yisney9802@gmail.com.

Lic. Arlett Díaz Zurita. Aeropuerto Internacional José Martí, Boyeros Ave, Havana, Cuba. E-mail: adzurita378@gmail.com.

Conflicto de intereses: Los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

Contribución de los autores: **Concepción de la idea:** Pedro M. González Jardines. **Manejo de los datos:** Yisney Quiñones Trujillo. **Análisis de los datos:** Yisney Quiñones Trujillo. **Investigación:** Yisney Quiñones Trujillo, Pedro M. González Jardines. **Metodología:** Pedro M. González Jardines. **Supervisión:** Arlett Díaz Zurita, Pedro M. González Jardines. **Validación de los resultados:** Arlett Díaz Zurita, Pedro M. González Jardines.

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/)