



## Pronóstico de viento a corto plazo utilizando el modelo WRF en tres regiones de interés para el Programa Eólico Cubano

### Short-term wind forecast using the WRF model in three regions of interest for the Cuban Wind Program

Lic. Alfredo Roque Rodríguez✉, Lic. Adrian Ferrer Hernández, Lic. Israel Borrajero Montejo, MSc. Maibys Sierra Lorenzo, Lic. Alfredo Valdés Verde

*Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba*

#### Resumen

En la actualidad el empleo de la energía eólica para la producción de electricidad es cada vez más creciente. En el último reporte del Consejo Mundial de Energía Eólica se ha dado a conocer que en la última década se ha alcanzado una capacidad acumulada de 433 GW a finales del 2015. Cuba, que ha apostado también por un uso cada vez mayor de las fuentes renovables de energía, se ha propuesto una proyección de más de 600 MW de energía eólica hasta el 2030. Sin embargo, la conexión a la red de este tipo de energía, representa un gran reto y por tanto se hace necesario la creación de herramientas de predicción de la energía a producir por los parques eólicos a instalar, las que resultan ser decisivas a los fines del despacho nacional de carga (DNC) en la planificación de la energía eléctrica a entregar a los consumidores. Por tal motivo el presente trabajo, se enfoca a encontrar una metodología de trabajo que permita realizar pronósticos a corto plazo del viento de manera confiable que pueda en un estudio posterior vincularse a la curva de potencia del parque para elaborar un pronóstico energético de interés para el DNC. Para este propósito, fue empleado el modelo WRF, de amplio uso en la esfera internacional, que incluye además este tipo de estudio. La variable a pronosticar es la magnitud de la rapidez del viento hasta 36 horas de pronóstico en lugares de emplazamiento de Torres de Referencia Meteorológica con diferentes condiciones físico-geográficas. Los resultados muestran que el modelo sobrestima los valores de rapidez del viento y que además los errores en el pronósticos son mayores para las costas que en las zonas interiores, lo que indica la realización de nuevos estudios con la finalidad de obtener resultados más confiables.

✉ Autor para correspondencia: *Alfredo Roque Rodríguez*, Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, La Habana, Cuba. CP: 17032. ☎: (+53) 7-868-6592. E-mail: [alfredo.roque@insmet.cu](mailto:alfredo.roque@insmet.cu)

Recibido: 9 de septiembre de 2016

Aceptado: 24 de octubre de 2016

**Palabras clave:** viento, pronóstico, energía eólica

## **Abstract**

Nowadays, the use of wind energy for electricity production is increasing. In the last report of the World Wind Energy Council it has been announced that in the last decade a cumulative capacity of 433 GW has been reached by the end of 2015. Cuba, which has also opted for an increasing use of renewable sources of energy, a projection of more than 600 MW of wind energy has been proposed until 2030. However, the connection to the grid of this energy type represents a great challenge and therefore it is necessary to create prediction tools of the energy to be produced by the wind farms to be installed, which are decisive for the purposes of the National Load Office (DNC according its acronyms in Spanish) in planning the electric energy to be delivered to consumers. For this reason the present work focuses on finding a working methodology that allows making short-term forecasts of the wind in a reliable way that in a later study can be linked to the power curve of the park to elaborate an energetic forecast of interest for the DNC. For this purpose, the WRF model was used, widely used in the international sphere, which also includes this type of study. The variable to be forecast is the magnitude of the wind speed up to 36 hours of forecast in places of location of Meteorological Reference Towers with different physical-geographical conditions. The results show that the model overestimates the values of wind speed and also that the errors in the forecasts are higher for the coast than in the interior zones, which indicate the realization of new studies in order to obtain more reliable results.

**Key words:** wind, forecast, wind energy

## **Introducción**

El Consejo Mundial de Energía Eólica (GWEC), ha publicado recientemente el continuo crecimiento que ha tenido el empleo de la energía eólica en la última década, totalizando una capacidad acumulada de 433 GW a finales del 2015 ([GWEC, 2016](#)). Cuba, aunque de manera modesta, se ha integrado al uso de esta energía y ha proyectado la introducción al sistema eléctrico nacional (SEN) de 633 MW de energía eólica hasta el año 2030. Tal penetración de esta energía al SEN representa poco más del 10%, lo que ayudara en unión de otras energías renovables a ir cambiando la matriz energética y con ello contribuir a una

disminución significativa del uso de combustibles fósiles para satisfacer la demanda eléctrica del país.

El empleo de la energía eólica trae nuevos retos y especialmente para Cuba por ser una isla y no poder complementarse de otros sistemas eléctricos provenientes de otros países, como sucede en Europa. Resulta clave ante tal proyección, la creación de herramientas de pronósticos que hagan predecible este tipo de energía con el objetivo de hacerla planificable para los fines de operación y mantenimiento de los parques eólicos.

Para tales retos, el programa de investigación para el empleo de la energía eólica se ha propuesto la elaboración de pronósticos energéticos para parques

eólicos, basado fundamentalmente en la generación de pronósticos de vientos con buena confiabilidad, empleando para ello la modelación numérica, específicamente el modelo WRF, de amplio uso en la esfera internacional.

Por tal motivo, el objetivo del trabajo es evaluar la habilidad del modelo numérico WRF para elaborar pronósticos de viento a corto plazo con alta resolución para tres sitios con diferentes condiciones físicas-geográficas, ampliando el trabajo realizado por [Valdés et al., \(2015\)](#), en el que utilizó solo dos dominios.

## Materiales y Métodos

Se utilizó el modelo numérico de pronóstico Weather Research & Forecasting (WRF) ([Mesoscale & Microscale Meteorology Division, 2014](#)), desarrollado por un consorcio formado por agencias gubernamentales y universidades de USA, de amplio uso en las investigaciones meteorológicas aplicadas, entre las cuales están las relacionadas con la estimación y pronóstico del recurso eólico ([Adams & Keith, 2007](#); [Claire & Yubao, 2010](#); [Draxl et al., 2010](#); [Storm & Basu, 2010](#); [Yubao, 2010](#); [Zelle et al., 2010](#)) en diferentes regiones.

El WRF es un modelo tipo no-hidrostático que resuelve las ecuaciones primitivas que controlan la circulación atmosférica. El modelo representa el estado de la atmósfera en una rejilla tridimensional en términos de unas diez variables fundamentales (las tres componentes de viento  $u, v, w$ , la temperatura, presión, humedad y varias especies microfísicas que representan las diferentes fases del agua líquida). El modelo obtiene sus condiciones

de frontera de datos procedentes de modelos globales del clima provenientes de centros operacionales de pronóstico del tiempo, en particular del Global Forecast System (GFS), resolución 0.5 grados (~55 km).

Las corridas con el modelo WRF se hicieron para 3 sitios donde se encuentran emplazadas torres de referencia meteorológica ([Figura 1](#)), atendiendo a su ubicación geográfica y a la posibilidad de contar con datos medidos en cada sitio, lo que posibilita hacer una evaluación del desempeño del modelo para estos fines. Las torres seleccionadas fueron las de Caibarién TV en la costa norte, Camagüey TV en la zona interior de la isla y alejada de la influencia costera y el Brinco, ubicada en la costa sur de Matanzas.



**Figura 1.** Torres de Referencia seleccionadas para los experimentos con el modelo WRF. Caibarién TV en la costa norte, Camagüey TV en el interior de la Cuba y El Brinco en la costa sur de Matanzas, Cuba

El periodo para efectuar las corridas del modelo fue el 2008, por ser un periodo común de observaciones para las 3 torres seleccionadas. Los datos utilizados para inicializar el WRF fueron los reanálisis del GFS para ese año, en el horario de las 0000 UTC, realizando pronósticos de 24 horas.

Estas torres cuentan con mediciones cada 10 min de la variable rapidez del viento en 4 niveles de medición (10, 30, 50 y 100 m), además de otras variables (Roque *et al.*, 2015b).

La configuración del modelo, incluyendo las parametrizaciones, se muestra en la [tabla 1](#), las que han sido estudiadas en trabajos anteriores (Mitrani *et al.*, 2003, 2004; Sierra *et al.*, 2014).

Con esta configuración se realizaron 2 experimentos (Exp. 1 y Exp. 2):

- **Exp. 1:** Se definieron tres dominios anidados bidireccionalmente, que abarcan a Cuba entera, con resoluciones 27, 9, y 3 km.
- **Exp. 2:** Se definieron dos dominios anidados bidireccionalmente, que abarcan a Cuba entera con resoluciones 27 km y 9 km. Además se definieron dominios locales para

cada una de las torres mencionadas con resolución de 3 km.

El diseño de los experimentos obedece a conocer cuánto puede aportar el aumento de la resolución del dominio en el pronóstico obtenido y al mismo tiempo conocer cuánto aporta el cambio de tamaño de los dominios en la obtención del mismo pronóstico. La [figura 2](#), muestra la ubicación y el área que abarca cada dominio diseñado.

Todas las salidas pronosticadas fueron datos trihorarios de la rapidez del viento, para los niveles de 10, 30, 50 y 100 m. Se comparará el perfil vertical del viento, dado por el modelo y el que se obtiene aplicando la ley de potencia del viento (Emeis 2013), tomando como referencia el valor de 10 m y los valores del exponente de variación vertical del viento (alfa) para distintas categorías de estabilidad (estable, neutral e inestable) para cada sitio de emplazamiento,

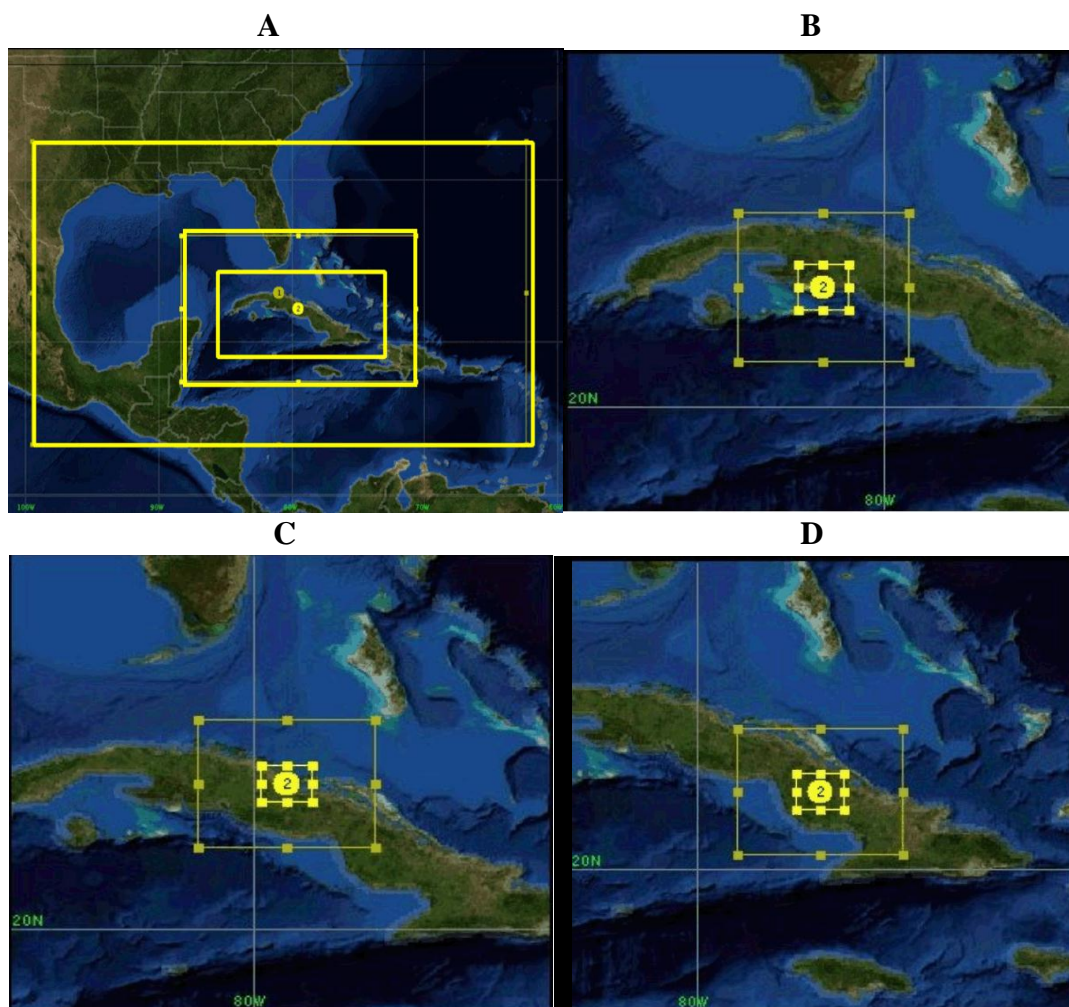
**Tabla 1.** Parametrizaciones utilizadas en el modelo WRF para el desarrollo del Trabajo

Parámetro	Clasificación	Descripción
Microfísica	WSM5	Esquema de momento de cinco categorías.( <i>mp_physics= 4</i> )
Parametrización de cúmulos	-	No necesaria para dominios con celdas menores de 4km, para mayores celdas se utiliza el esquema Grell-Devenyi. ( <i>cu_physics= 3</i> )
Radiación de onda corta	DudhiaScheme	Esquema descendente simple que considera la absorción y dispersión en cielos claros o en presencia de nubes.( <i>ra_sw_physics= 1</i> )
Radiación de onda larga	RRTM scheme (Rapid Radiative Transfer Model)	Esquema preciso que considera múltiples anchos de banda, gases trazadores y especies microfísicas.( <i>ra_lw_physics= 1</i> )
Capa atmosférica superficial	Monin-Obukhov (JanjicEta)	Calculo basado en la ecuación de Monin-Obukhov, ( <i>sf_sfclay_physics= 2</i> ) ( <i>sf_surface_physics= 2</i> )
Modelo de superficie	Noah land-surface model	
Capa límite Planetaria (PBL)	MYNN 2.5 level TKE	Esquema moderno con tratamiento explícito de la capa de arrastre de la cima de la capa limite ( <i>bl_pbl_physics= 5</i> )

determinados por [Roque et al., \(2015b\)](#), y que se muestran en la [tabla 2](#).

Para determinar los tipos de estabilidad atmosférica a partir de las salidas numéricas se procedió de la siguiente manera: La velocidad del viento a alturas de 30, 50 y 100 m se obtiene a partir del valor de la misma a 10 m mediante la aplicación de la ley de potencia del viento. El método utilizado de clasificación en categorías de

estabilidad es una variante de la clasificación de [Pasquill \(1961\)](#). En este caso se ha aplicado un método reportado por [Magidi \(2013\)](#), que utiliza (casi) los mismos rangos de velocidad del viento y en lugar de cobertura nubosa aplica rangos numéricos de radiación solar incidente en el horario diurno y de balance de radiación por la noche, lo cual tiene mucho más sentido físico. Todos estos parámetros se



**Figura 2.** Dominios confeccionados para los experimentos descritos. (A) Exp.1, (B), (C), (D) Exp. 2, en estos se observan los dominios locales de 3 km de resolución que en un futuro alimentarán dominios más pequeños con resolución de 1 km

**Tabla 2.** Valores del exponente alfa de la ley de potencia del viento para cada tipo de estabilidad en las torres de referencia meteorológica seleccionadas

Estaciones	Estable	Neutro	Inestable
Caibarién TV	0.35	0.21	0.13
Camagüey TV	0.53	0.30	0.19
El Brinco	0.47	0.37	0.27

pueden obtener o calcular a partir de las variables de salida del WRF ([Tabla 3](#)).

Las seis categorías originales se reducen a tres más generales: 'inestable' ('A','AB','B','BC'), 'neutra' ('C','CD','D') y 'estable' ('E','F') y se asigna para cada estación el exponente alfa correspondiente de la ley de potencia de la velocidad en función de la altura. A continuación se calculan por esta relación los valores de velocidad del viento a 30, 50 y 100 m. Para evaluar la efectividad de los pronósticos, se calcularon los siguientes estadígrafos: Valor medio de la rapidez del viento y el Error medio absoluto EMA.

## Resultados y Discusión

### 1. Torre de Caibarién TV

#### Valor medio anual pronosticado de la rapidez del viento

La [figura 3](#) muestra el valor medio anual

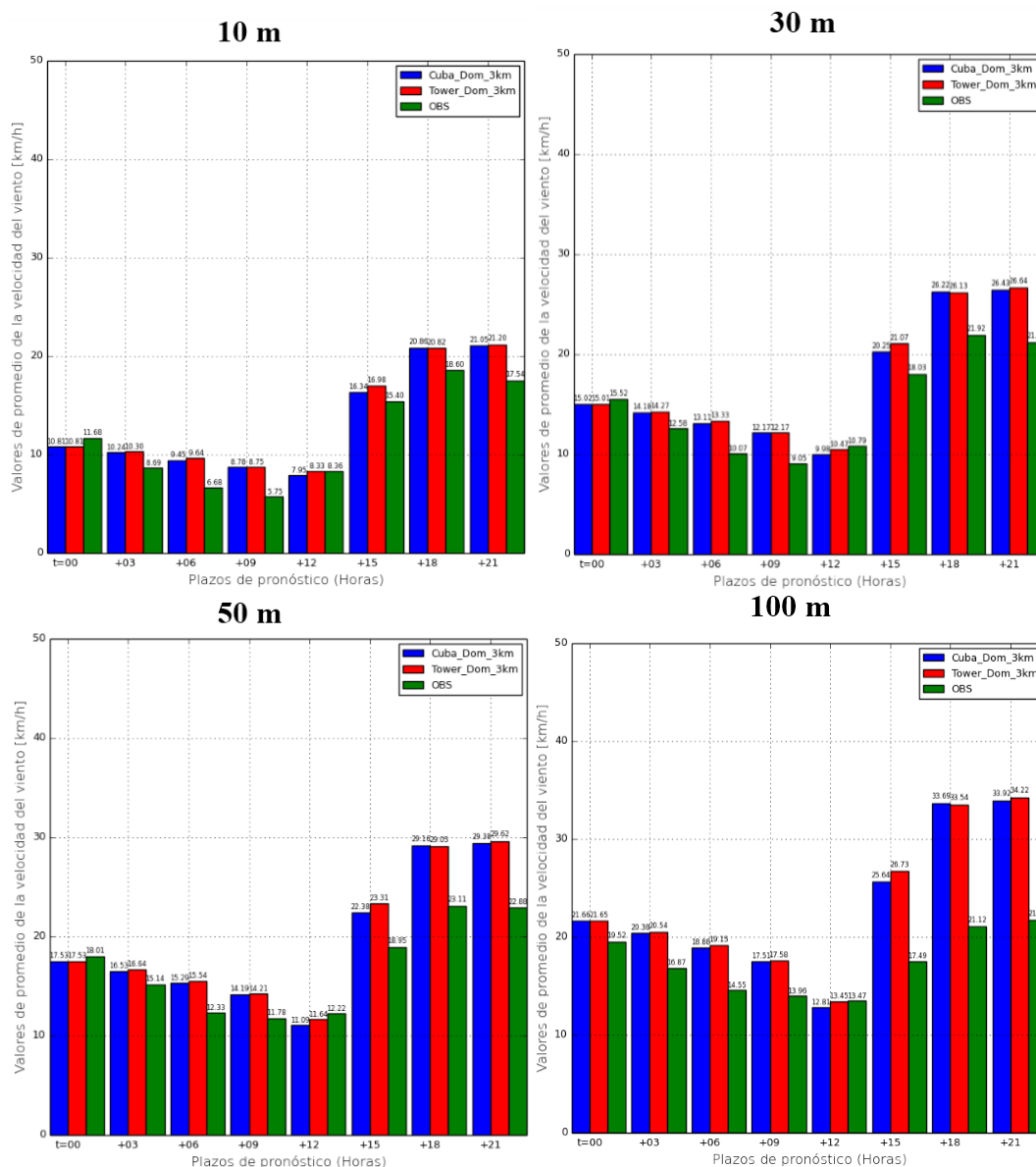
pronosticado de la rapidez del viento para la torre de Caibarién TV. En el mismo se aprecia la oscilación diurna de esta variable para ambos experimentos (barras azules y rojas), la que se corresponde con los valores medidos por los instrumentos en la ubicación de la torre (barras verdes). En la misma puede observarse la sobreestimación de los valores dados por el modelo para ambos experimentos con respecto a los valores reales y que esta sobrestimación se hace mayor en la medida que se asciende en la capa superficial atmosférica y después de las 15 horas de pronóstico. Además la diferencia entre los valores pronosticados es casi imperceptible, lo que se confirmará en el próximo epígrafe cuando se analice el error medio absoluto.

Lo más importante de este análisis es que el modelo describió bien el comportamiento diurno de la rapidez del viento para todos los niveles de altura en la torre de Caibarién ([Roque et al., 2015c](#)).

**Tabla 3.** Parámetros empleados

Viento (m/s)	Horario Diurno				Horario Nocturno			
	Radiación Solar (Langleyes)				Balance de Radiación (Langleyes)			
	>50	25-50	12.5-25	<12.5	>-1.8	-1.8- -3.6	< -3.6	
< 2	A	A-B	B	D	D	-	-	
2-3	A-B	B	C	D	D	E	F	
3-4	B	B-C	C	D	D	D	E	
4-6	C	C-D	D	D	D	D	D	
>6	C	D	D	D	D	D	D	

\*Ly (Langleyes) = 0.085985 watt/m<sup>2</sup>



**Figura 3.** Promedio anual de la rapidez del viento observado y pronosticado por el modelo WRF-ARW para las inicializaciones de las 0000 UTC del año 2008 para los dos experimentos realizados. Exp. 1 (barra azul) y Exp. 2 (barra roja) vs valores reales (barra verde). Torre de Caibarién TV

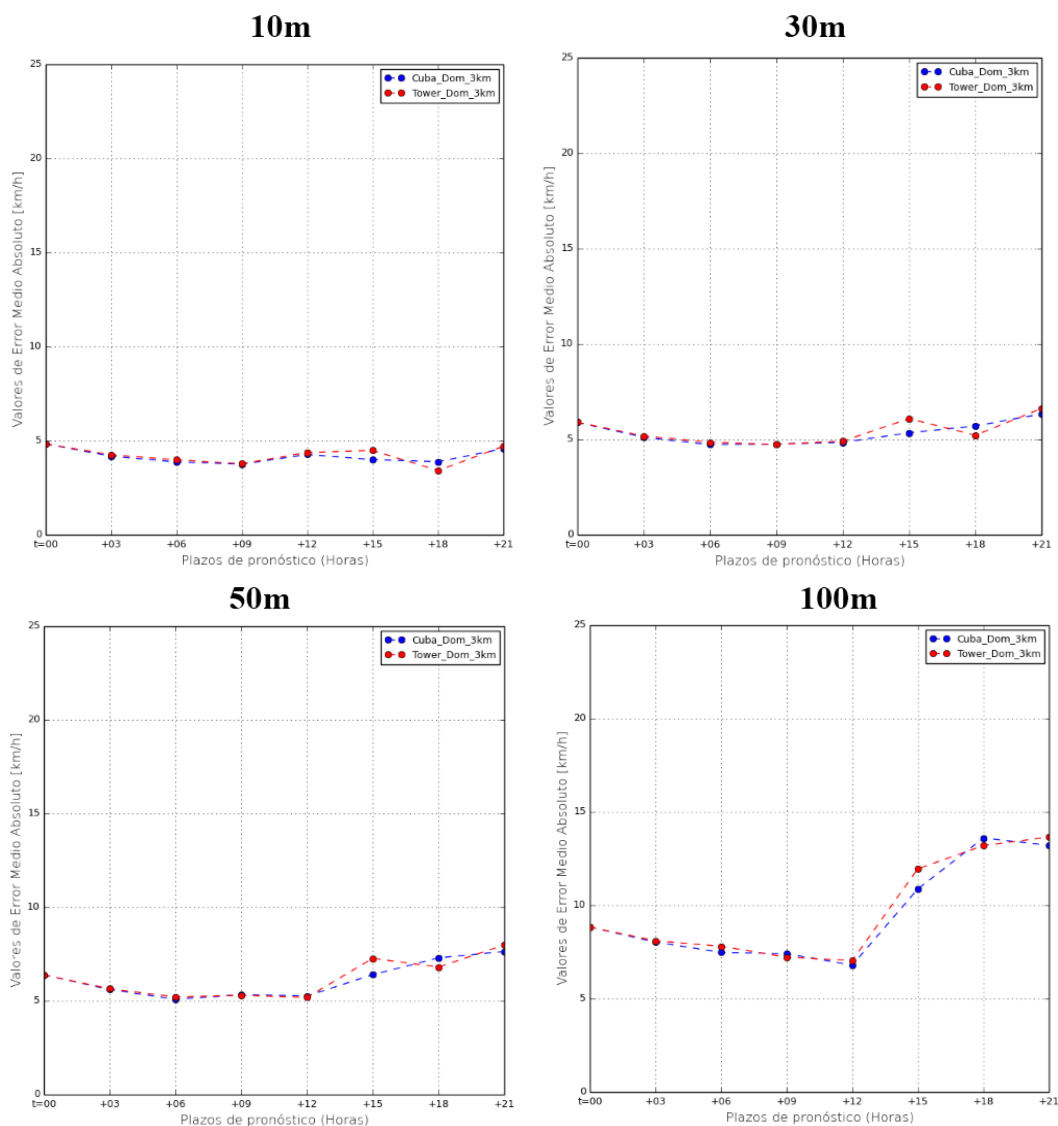
**Error medio absoluto (EMA)**

La [figura 4](#) muestra el comportamiento del error medio absoluto (EMA) entre los

valores pronosticados y observados para la torre de Caibarién, para los 2 experimentos realizados, teniendo en cuenta los distintos plazos de pronósticos y los distintos niveles de altura sobre la superficie terrestre en

correspondencia con las mediciones realizadas en las torres. Se aprecia que no hay diferencias significativas entre los errores medios absolutos para los dos experimentos, denotando que la disminución del tamaño del dominio en

aras de conseguir un menor tiempo en la obtención del pronóstico, no arrojó mejores resultados. Aunque las diferencias son pequeñas, generalmente en el experimento 1 se obtuvieron los menores errores absolutos.



**Figura 4.** Error medio absoluto (EMA) de la rapidez del viento pronosticado por el modelo WRF-ARW para las inicializaciones de las 0000 UTC del año 2008 para los dos experimentos realizados. Exp. 1 (curva azul) y Exp. 2 (curva roja). Torre Caibarién TV



Para ambos experimentos los menores EMA (~ 5 km/h o 1.4 m/s), se obtuvieron entre las 3 y 12 horas de pronóstico, hasta el nivel de 50 m, coincidiendo con los horarios en presencia de estabilidad atmosférica, estando los mínimos entre las 9 y 12 horas. Para el nivel de 100 m, aunque los mínimos (5-10 km/h) y máximos (10-15 km/h) del EMA se alcanzaron en los mismos horarios que los niveles anteriores, los valores fueron muy superiores, aunque inferiores a los obtenidos por [Valdés et al., \(2015\)](#), para todos los niveles. Sin embargo, el comportamiento para los plazos de pronósticos de 3 y 12 horas fue muy similar.

Se puede destacar que los mayores EMA se encontraron para los horarios donde había inestabilidad atmosférica, coincidentemente con los mejores valores de rapidez del viento para su aprovechamiento energético en la costa norte ([Soltura et al., 2006](#); [Roque et al., 2015a](#)). Otro aspecto de interés en la figura, es el incremento del EMA a medida que ascendemos en altura en la capa superficial atmosférica para todos los plazos de pronóstico. Por ejemplo, en el nivel de 10m, los menores errores están por debajo de 5 km/h (1.4 m/s), sin embargo para los niveles de 30 y 50m, estos errores fueron, en los mismos plazos de pronóstico de 5 – 6 km/h (1.3 – 1.7 m/s) y entre 10 – 12 km/h (2.8 – 3.3 m/s) para los 100 m de altura.

**Comportamiento del valor medio de la rapidez del viento y el error medio absoluto para los Periodo Lluvioso (Mayo – Octubre) y Poco Lluvioso (Noviembre – Abril)**

Para facilitar la comprensión del trabajo se mostraron solo los niveles de 10 y 50m de altura, aunque los demás niveles pueden consultarse en [Roque et al., \(2015a\)](#).

Para el periodo poco lluvioso (PPLL) ([Figura 5](#)) se aprecia una tendencia similar a lo visto para el año entero. Nuevamente los valores pronosticados superan en magnitud a los observados para ambos experimentos y el error medio absoluto aumenta con la altura, pero sin diferencias significativas entre los dos experimentos.

Para el periodo lluvioso (PLL) ([Figura 6](#)), aunque se mantiene la representatividad de la variable, con mínimos en las horas de noche y madrugada y máximos en las horas del mediodía y la tarde, los errores medios absolutos son inferiores para los plazos de pronósticos entre las 03-09 y 18 horas, con respecto al periodo poco lluvioso para el nivel de 10m, siendo muy similar para el nivel de 50 m. Nuevamente las diferencias entre los dos experimentos no son significativas.

## **2. Torre El Brinco**

### **Valor medio anual pronosticado de la rapidez del viento**

Para la torre de El Brinco [Roque et al., \(2015c\)](#), encontraron que los mayores valores de rapidez media del viento se manifestaron en los horarios de noche y madrugada, principalmente por encima de los 30 m de altura, tal y como muestran las barras verdes. El modelo también refleja adecuadamente este comportamiento, mostrando un ascenso de los valores de rapidez del viento en los horarios de noche y madrugada en comparación con la torre de Caibarién TV, lo que se traduce en una

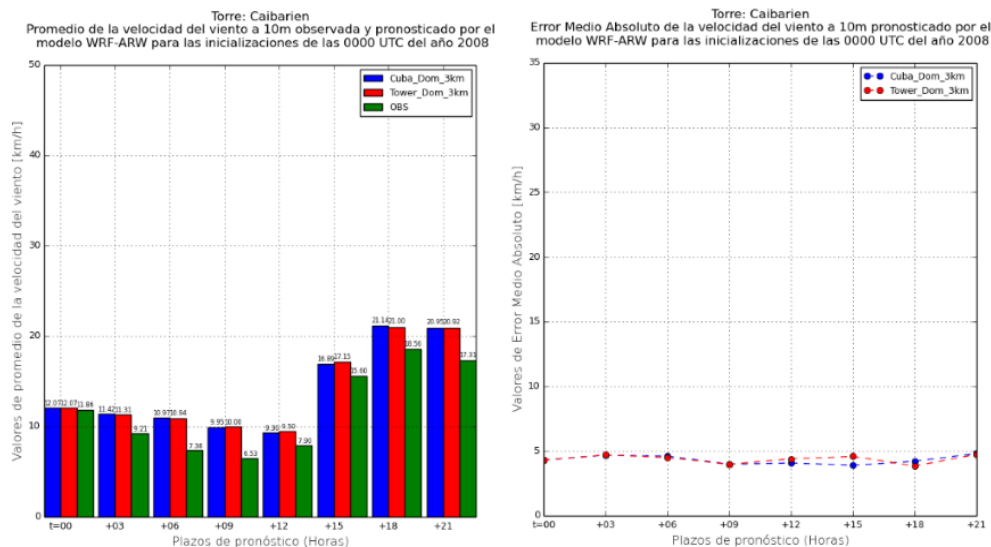
menor variación de los valores de rapidez del viento durante todo el día (Figura 7).

Sin embargo, se mantiene la

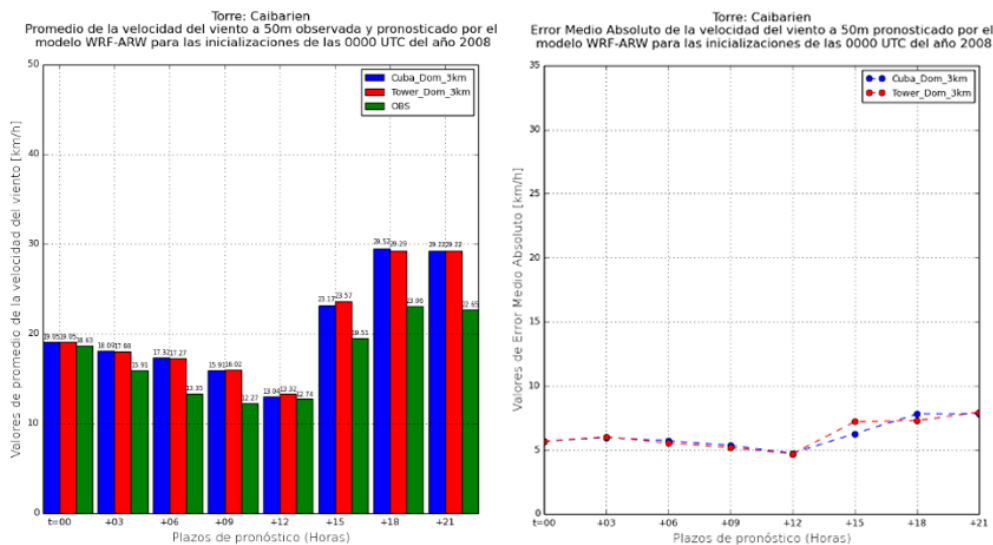
sobrestimación de los valores medios pronosticados por el modelo como ocurrió en Caibarién TV.

### Periodo PPLL

#### 10 m

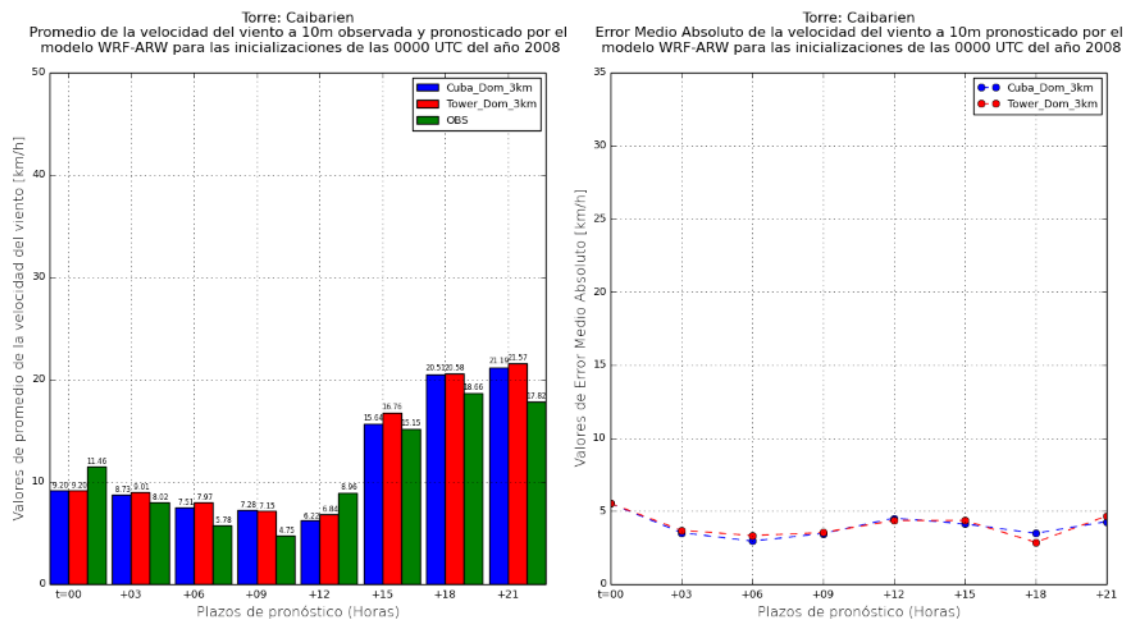


#### 50 m

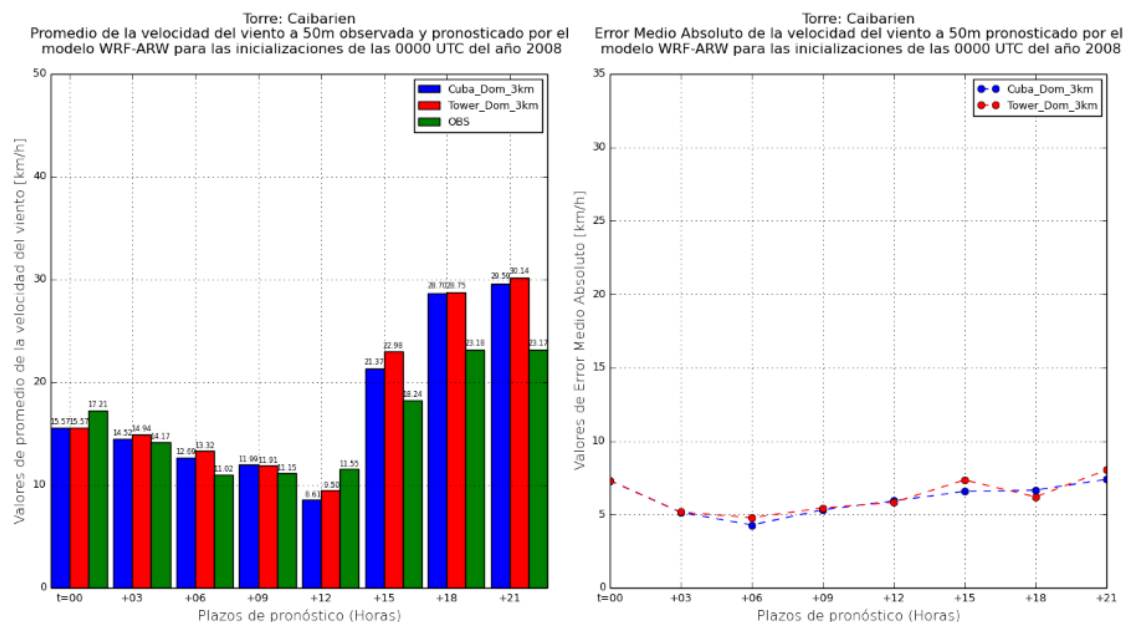


**Figura 5.** Comportamiento del valor medio anual pronosticado y error medio absoluto para el periodo poco lluvioso en el Exp. 1 (curva azul) y Exp. 2 (curva roja). Niveles de 10 y 50 m. Torre Caibarién TV

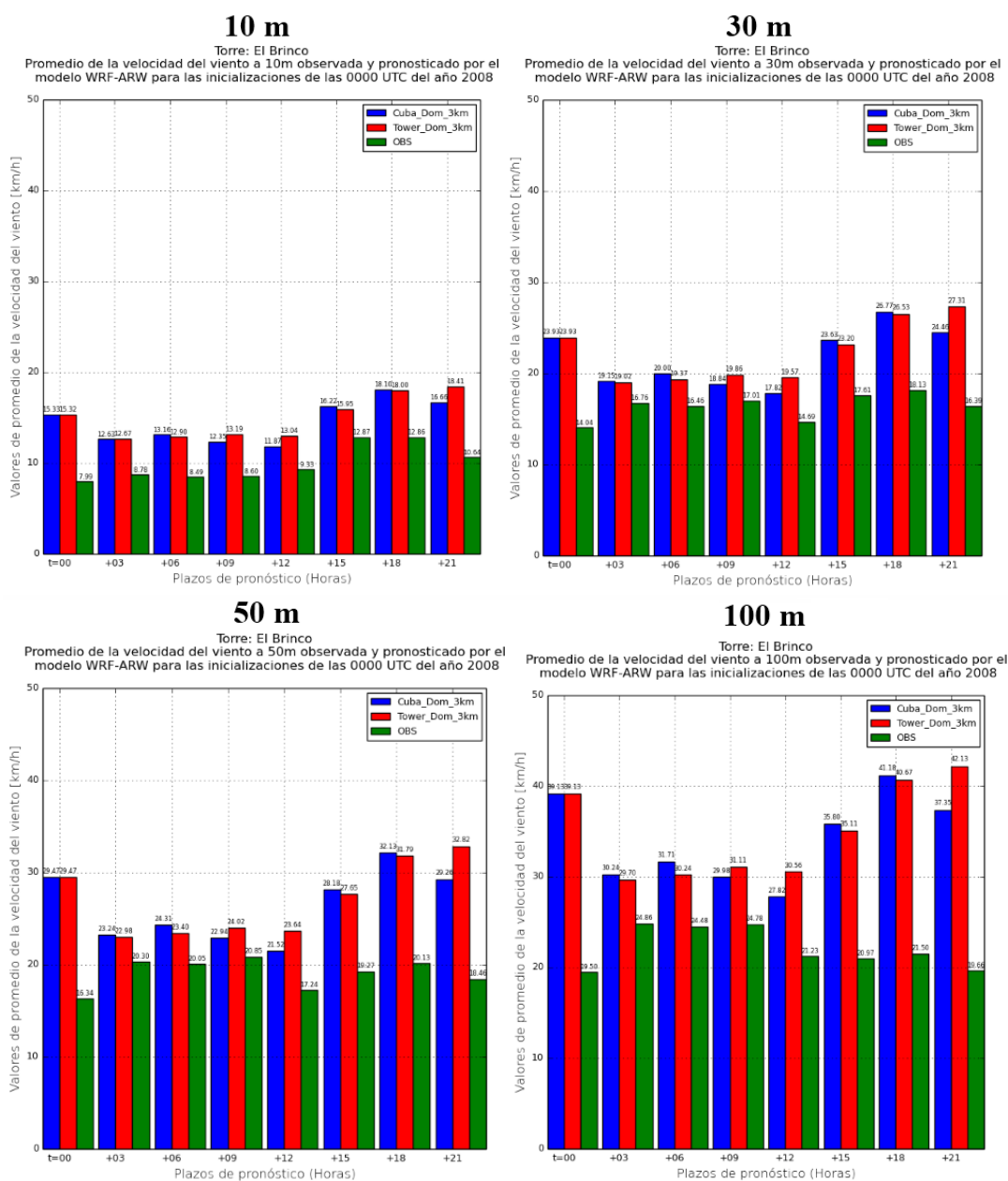
## Periodo PLL 10 m



## 50 m



**Figura 6.** Comportamiento del valor medio anual pronosticado y error medio absoluto para el periodo lluvioso en el Exp. 1 (curva azul) y Exp. 2 (curva roja). Niveles de 10 y 50m. Torre Caibarién TV



**Figura 7.** Valor medio anual de pronóstico de la rapidez del viento para los dos experimentos realizados. Exp. 1 (barra azul) y Exp. 2 (barra roja) vs valores reales (barra verde). Torre de El Brinco

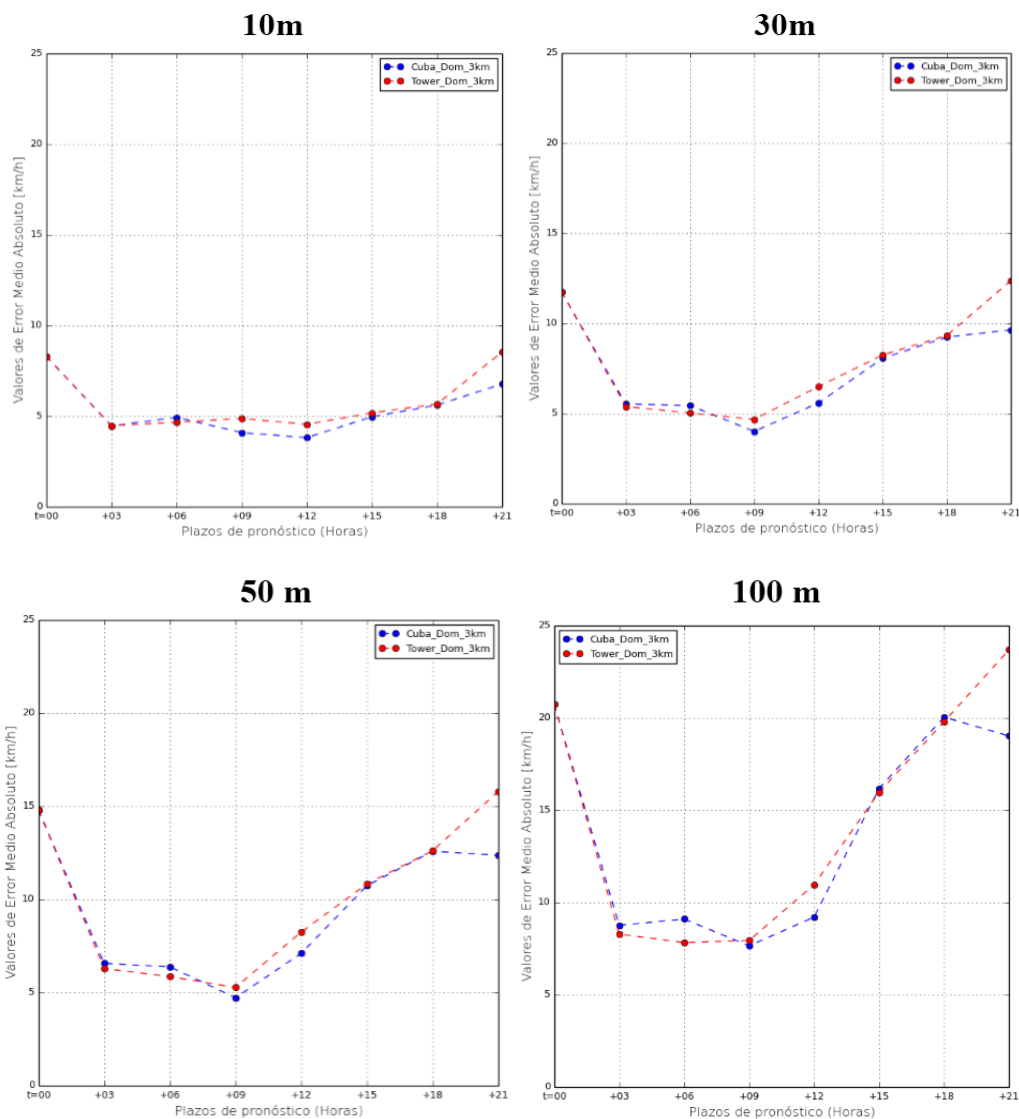
**Error medio absoluto (EMA)**

Para el caso de la torre de El Brinco se muestra un comportamiento similar a la

torre de Caibarién, con excepción del nivel de 100 m, en que para la torre de El Brinco sí se mantuvo el mismo comportamiento que en los niveles inferiores. En la [figura 8](#)

puede apreciarse, que para ambos experimentos los menores EMA ( $< 6$  km/h o 1.7 m/s), se obtuvieron entre las 3 y 12 horas de pronóstico, estando los mínimos entre las 9 y 12 horas de pronóstico. Por otra parte, los mayores errores medios absolutos se encontraron a las 00 y 21 horas de pronósticos, es decir al principio y final

del plazo de pronóstico. Nuevamente [Valdés et al., \(2015\)](#), encontraron valores superiores del EMA para todos los niveles, aunque con un comportamiento similar en los plazos de pronósticos. Para los niveles de 50 y 100 m los errores son superiores a lo encontrado en Caibarién TV.



**Figura 8.** Error medio absoluto (EMA) de la rapidez del viento para los dos experimentos realizados. Exp. 1 (curva azul) y Exp. 2 (curva roja). Torre El Brinco

A diferencia de lo encontrado en la torre de Caibarién, aquí es posible apreciar que en promedio el error medio absoluto es menor en el experimento 1 que en el experimento 2 para todos los niveles.

El comportamiento del EMA por niveles es muy similar a lo encontrado para la torre de Caibarién TV, es decir aumento de los errores con la altura y principalmente después de las 12 horas de pronóstico, lo cual sugiere en el orden práctico la realización de pronósticos cada 12 horas o menos para obtener mejores resultados.

### **Comportamiento del valor medio de la rapidez del viento y el error medio absoluto para los Periodo Lluvioso (Mayo – Octubre) y Poco Lluvioso (Noviembre – Abril)**

Del análisis ([Figura 9](#)), se aprecia un comportamiento similar, de los valores medios de rapidez del viento pronosticado, al comportamiento anual, cuyos valores para ambos experimentos son muy similares, lo cual se confirma cuando se aprecia el EMA, en que las diferencias son pequeñas. Aun así, en promedio para el experimento 1, se obtuvieron menores valores del EMA, siendo más notable para el último plazo de pronóstico.

Nuevamente se denota un aumento del EMA con la altura, como ya se había visto para Caibarién TV.

Para el caso del periodo lluvioso ([Figura 10](#)), se hace más notable las diferencias del EMA entre ambos experimentos, siendo en promedio, más bajos para el experimento 1 que para el experimento 2.

### **3. Torre Camagüey TV**

### **Valor medio anual pronosticado de la rapidez del viento**

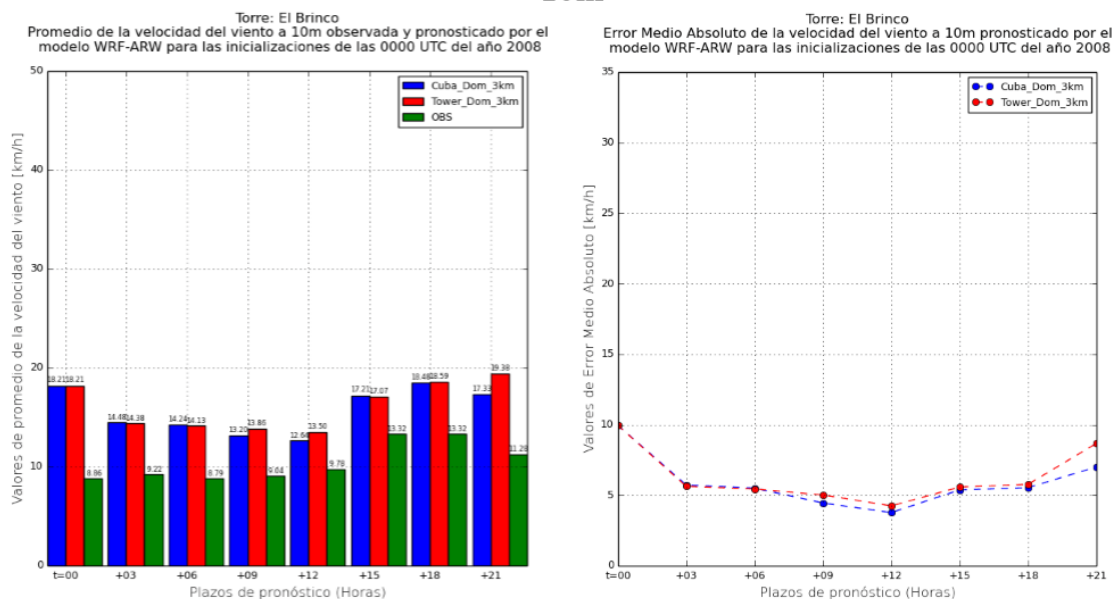
Para la Torre de Camagüey TV, los valores pronosticados en los dos experimentos ([Figura 11](#)) se refleja bien el ciclo diario de la rapidez del viento como muestran las barras verdes, sin embargo, nuevamente los valores del modelo (barras rojas y azules) sobrestiman los valores reales. También se aprecia una mayor diferencia en los valores medios pronosticados entre los dos experimentos, lo que puede ser corroborado con el error medio absoluto. Es decir en el experimento 2 se sobrestiman más los valores medios de rapidez del viento.

### **Error medio absoluto (EMA)**

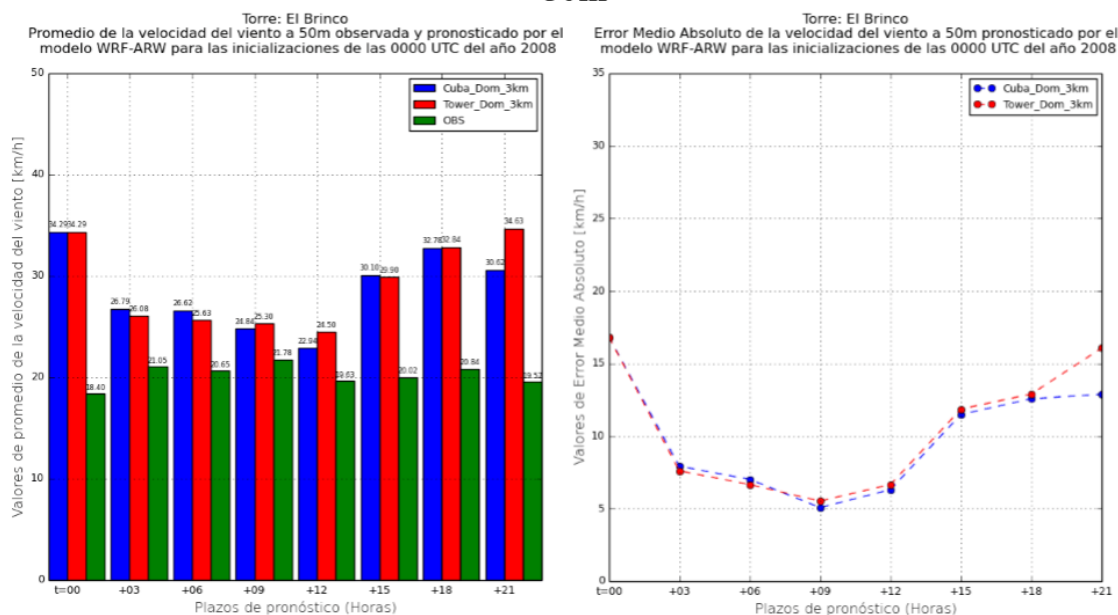
Para la torre de Camagüey, los resultados difieren de lo encontrado en las torres anteriores, especialmente en el segundo experimento. Como se muestra en la [figura 12](#), la diferencia entre el error medio absoluto para ambos experimentos presentan un comportamiento inverso en los plazos de pronósticos entre las 03 y 12 horas, siendo mucho mayor el error en el segundo experimento, es decir cuando disminuye el tamaño del dominio de 3km. Después del plazo 12, el comportamiento es similar a lo encontrado anteriormente para las otras torres, aunque con una diferencia más marcada a favor del experimento 1, es decir, menores EMA.

De igual manera, el comportamiento del error medio absoluto por niveles, presenta similitud con lo mostrado para las otras torres. En este caso Valdés, obtuvo mejores resultados en la altura del EMA, no siendo así en el nivel de 10m, en el que fue similar.

## Periodo PPLL 10m

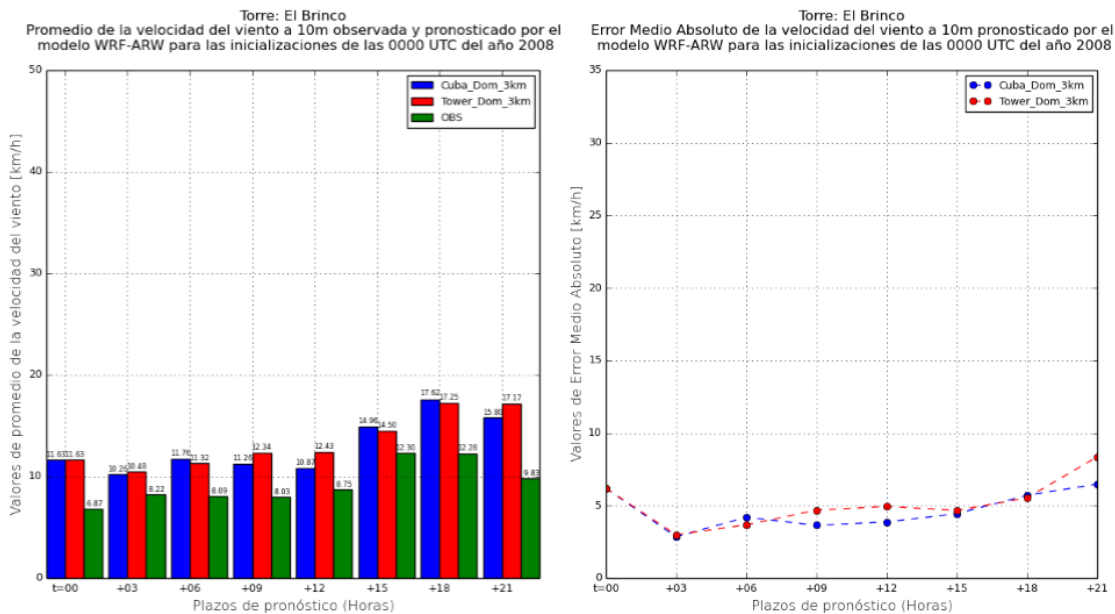


## 50m

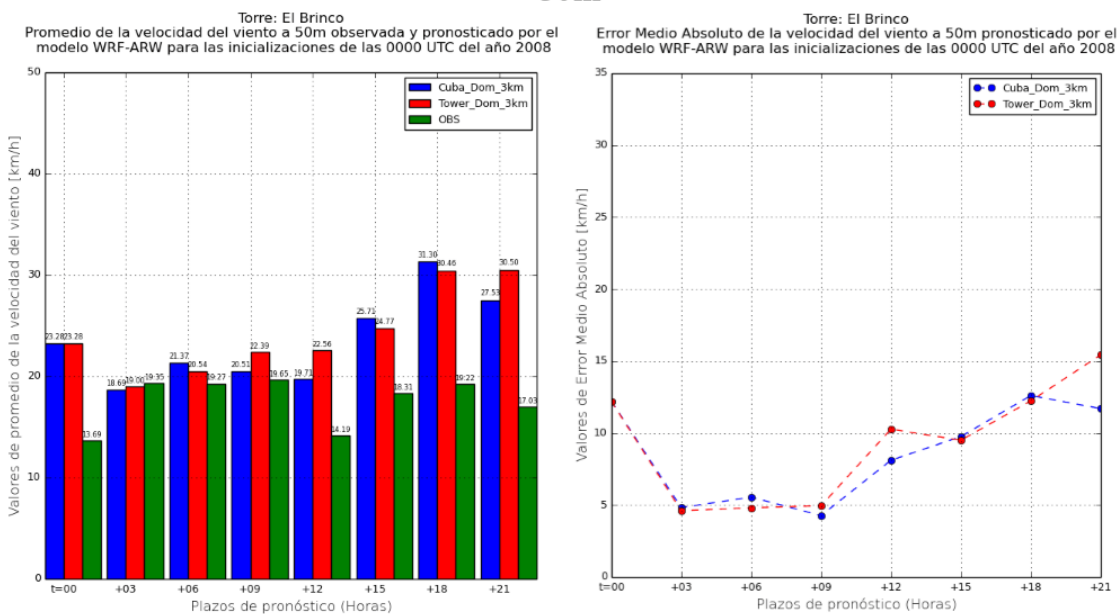


**Figura 9.** Comportamiento del valor medio anual pronosticado y error medio absoluto para el periodo poco lluvioso en el Exp. 1 (curva azul) y Exp. 2 (curva roja). Niveles de 10 y 50m. Torre El Brinco

## Periodo PLL 10m

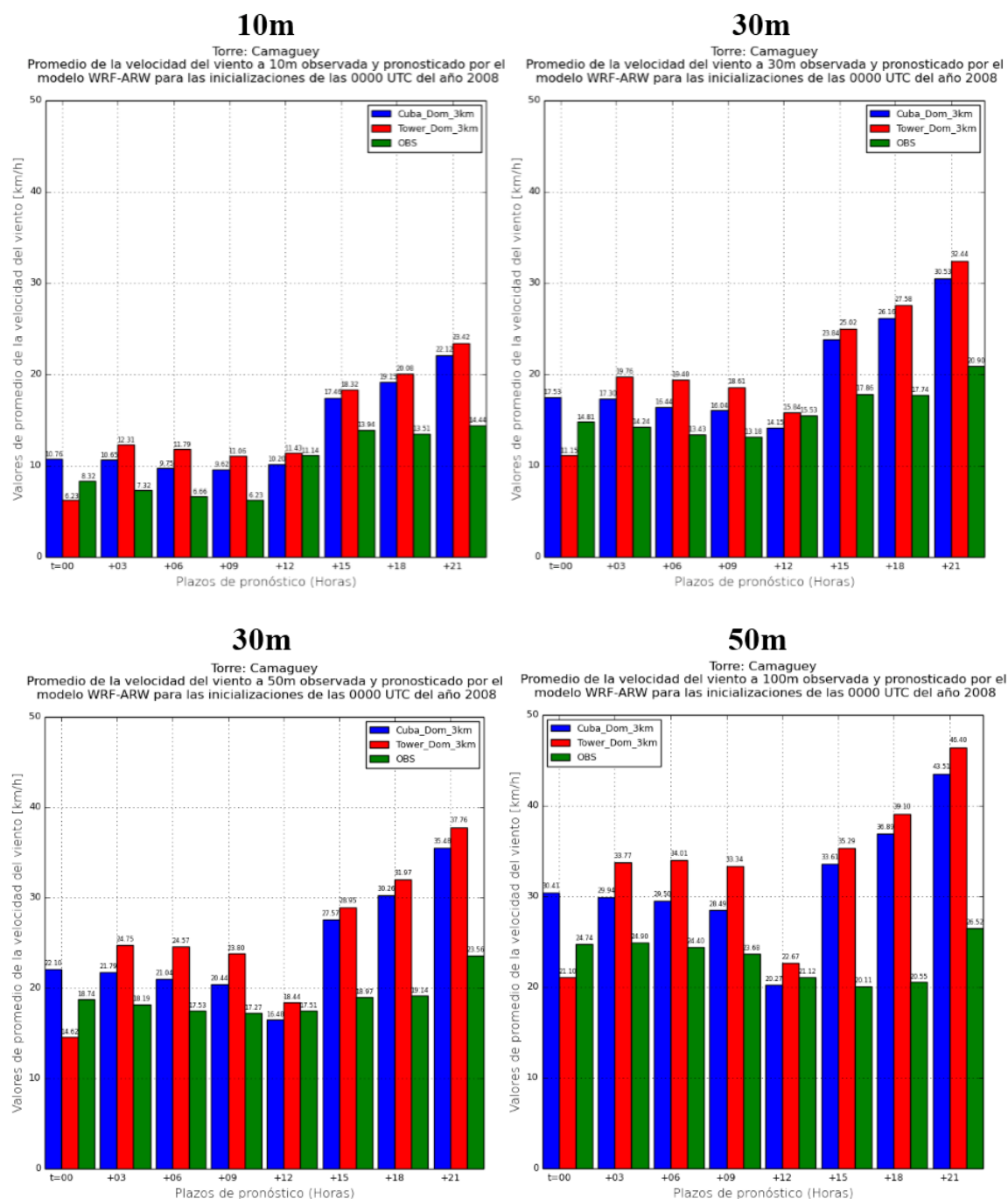


## 50m

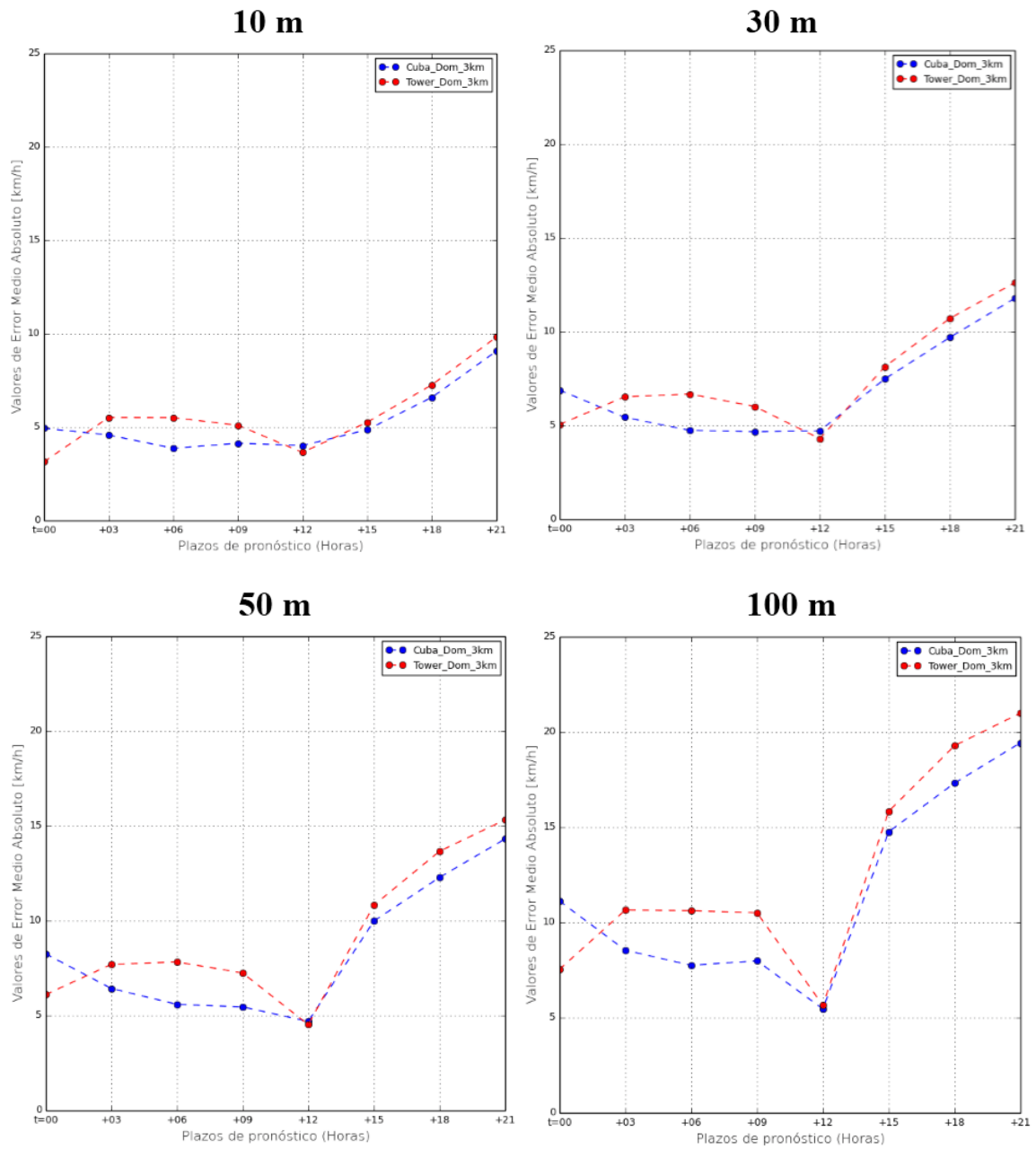


**Figura 10.** Comportamiento del valor medio anual pronosticado y error medio absoluto para el periodo lluvioso en el Exp. 1 (curva azul) y Exp. 2 (curva roja). Niveles de 10 y 50 m. Torre El Brinco





**Figura 11.** Valor medio anual de pronóstico de la rapidez del viento para los dos experimentos realizados. Exp. 1 (barra azul) y Exp. 2 (barra roja) vs valores reales (barra verde). Torre de Camagüey TV



**Figura 12.** Error medio absoluto (EMA) de la rapidez del viento para los dos experimentos realizados. Exp. 1 (curva azul) y Exp. 2 (curva roja). Torre de Camagüey TV

### **Comportamiento del valor medio de la rapidez del viento y el error medio absoluto para los Periodo Lluvioso (Mayo – Octubre) y Poco Lluvioso (Noviembre – Abril)**

El análisis estacional por periodos poco lluvioso y lluvioso, arrojó resultados diferentes de las torres anteriores. Para ambos experimentos, aunque el modelo refleja bien el ciclo diurno de la rapidez media del viento, los errores medios absolutos fueron menores para el experimento 1 ([Figura 13](#) y [Figura 14](#)), o lo que es lo mismo, en el experimento 2 se sobrestiman más los valores medios de rapidez del viento.

### **Comentarios finales del análisis**

El análisis realizado para ambos experimentos, muestra resultados similares entre las torres ubicadas en la costa, pero diferentes con respecto a la ubicada tierra adentro. Aunque para ambos experimentos el ciclo diurno del viento medio está bien representado, la magnitud del mismo es sobrestimada. Para las estaciones ubicadas en la costa, el cambio de dominio no arroja resultados significativos, lo que puede estar dado por el régimen de vientos que influye en un punto determinado en nuestro país. De todas las componentes que componen el vector viento, el más importante es el viento sinóptico, el cual ha sido muy bien explicado por diferentes autores ([Carnesoltas, 1986](#); [Lecha et al., 1994](#); [Soltura et al., 2006](#)), sin embargo otros factores, de índole local son también importantes, tal es el caso de la circulación de brisas ([Carnesoltas, 2002](#); [Carrasco et al., 2011](#); [Martínez & Roque, 2015](#)), pero que no suele ser bien representado por los

modelos numéricos, lo mismo que el viento debido a la orografía, factores todos que influyen en la magnitud y comportamiento del viento en un determinado sitio.

Por lo analizado en este trabajo, la poca diferencia en los resultados de ambos dominios, puede deberse a dos factores:

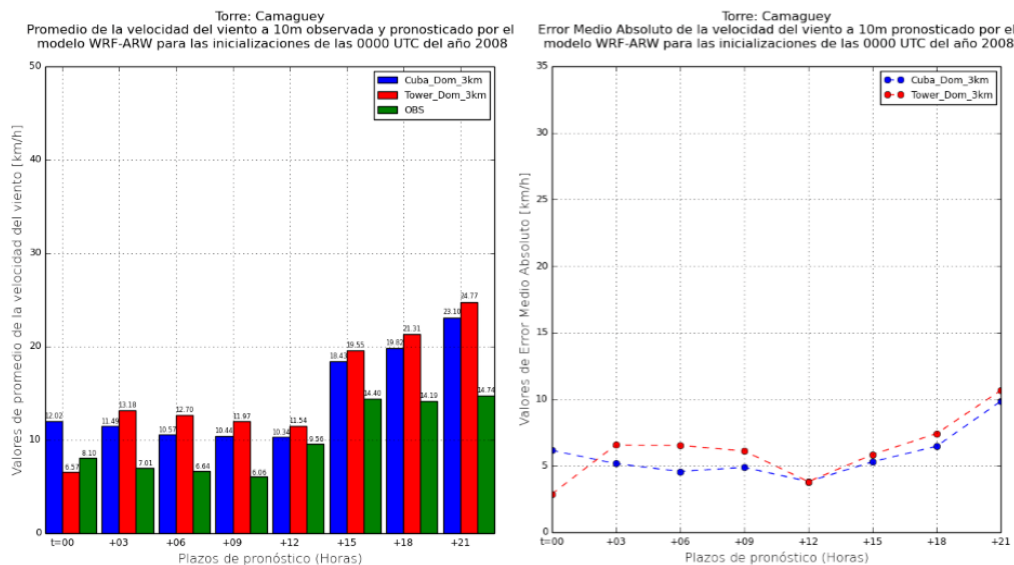
1. Las parametrizaciones empleadas no representan bien los efectos locales, especialmente en las costas y por este motivo, no se aprecia diferencia alguna en el viento medio pronosticado cuando se realiza el cambio de dominio, es decir, el viento sinóptico sigue siendo mejor representado en ambos dominios, y aunque para las regiones interiores, como es el caso de la torre de Camagüey TV, el experimento 1 mostró menores errores absolutos, lo cierto es que para los dos experimentos y todas las torres, el índice de correlación de Pearson (no mostrado por problemas de espacio, pero que puede consultarse en [Roque et al., \(2015a\)](#), fue mejor en el dominio más pequeño, es decir, correlaciona mejor con la magnitud del viento, mientras que el dominio más grande correlaciona mejor con el comportamiento.
2. Otro factor que puede incidir en los resultados alcanzados puede ser el relacionado con el tamaño de los dominios, es decir, aunque ambos tienen tamaños bien diferenciados, los procesos físicos y dinámicos que tienen lugar en el dominio mayor de 3km no se diferencian de los que tienen lugar en el dominio más pequeño de 3km, y esto está en correspondencia con el

punto anterior, relacionado con las parametrizaciones empleadas. Por lo que nuevos experimentos serán necesarios realizar para profundizar

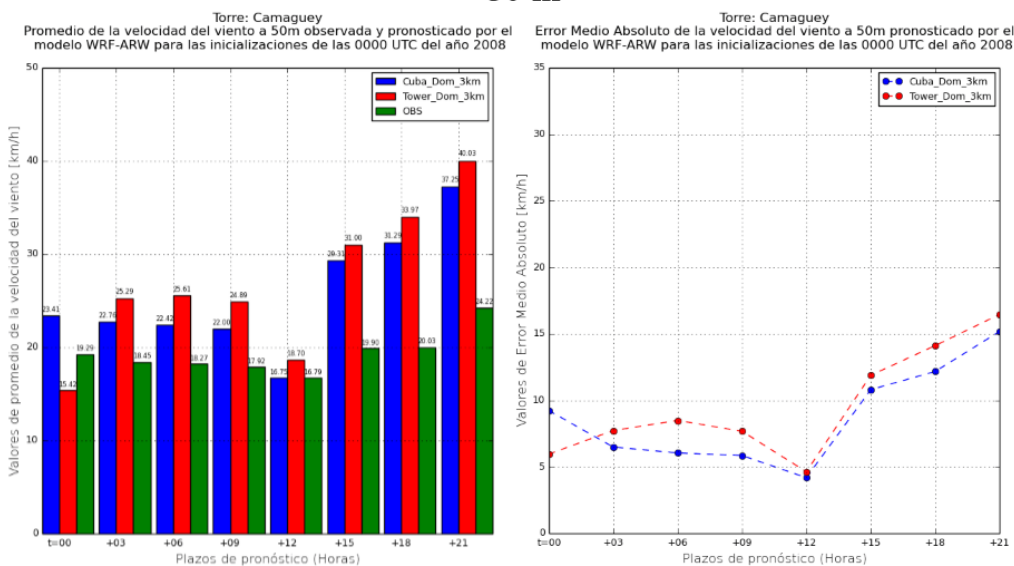
mucho más en los análisis realizados.

### Periodo PPLL

#### 10 m



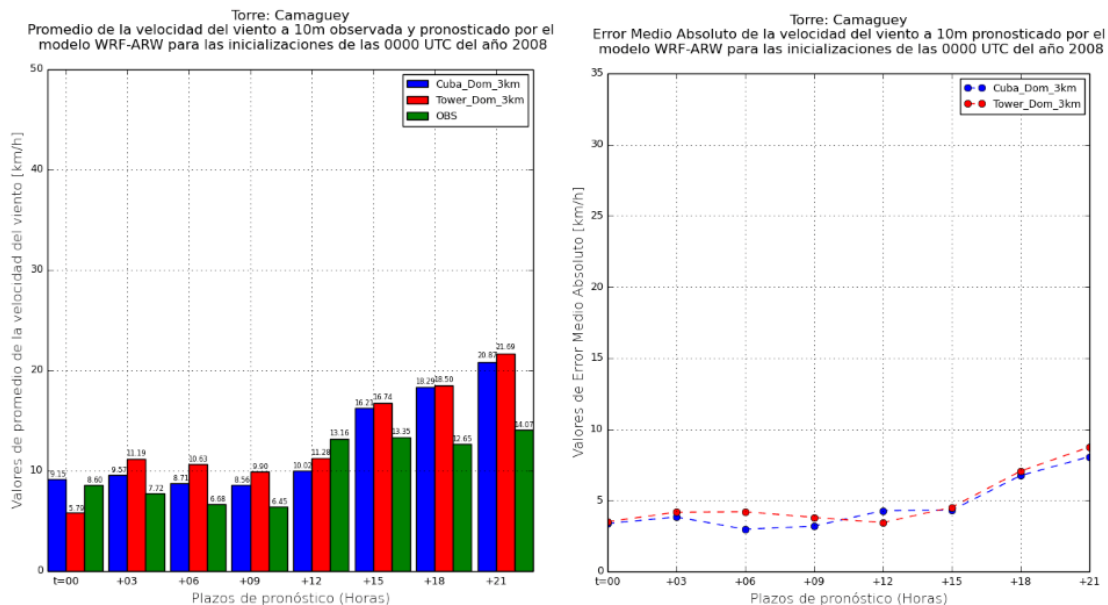
#### 50 m



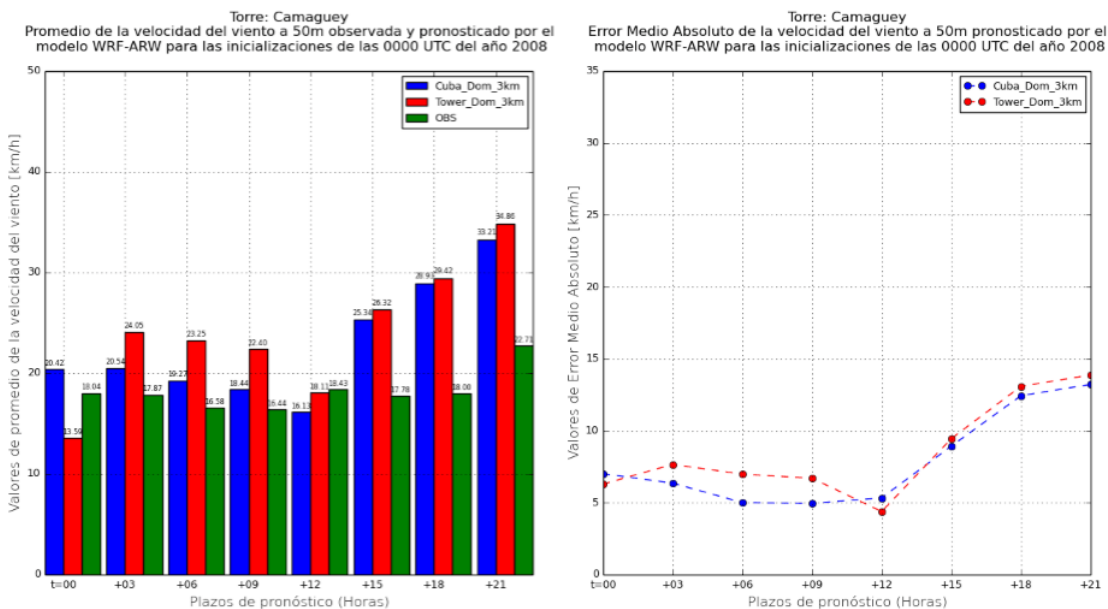
**Figura 13.** Comportamiento del valor medio anual pronosticado y error medio absoluto para el periodo poco lluvioso en el Exp. 1 (curva azul) y Exp. 2 (curva roja). Niveles de 10 y 50m. Torre Camagüey TV

## Periodo PLL

### 10 m



### 50 m



**Figura 14.** Comportamiento del valor medio anual pronosticado y error medio absoluto para el periodo lluvioso en el Exp. 1 (curva azul) y Exp. 2 (curva roja). Niveles de 10 y 50m. Torre Camagüey TV

## Conclusiones

- Los valores pronosticados por el modelo WRF, tienden a sobrestimar la fuerza del viento, aunque representan la marcha de la variable. Esto es válido tanto para el curso anual como estacional.
- No se aprecia una diferencia significativa entre los resultados de ambos experimentos (es decir, cambio del tamaño del dominio), en cuanto al comportamiento de los valores medios de rapidez del viento y los errores medios absolutos, aunque fueron en promedio, generalmente menores para el experimento 1, es decir 3km Cuba entera, estando los errores alrededor de los 5km/h (1.4 m/s) entre las 6 y 12 horas de pronóstico, es decir en los horarios de estabilidad atmosférica, estando los mayores errores en las horas de inestabilidad atmosférica, pero de mejor recurso eólico en la costa norte.
- Para ambos experimentos los EMA aumentan con la altura.
- Todas las estaciones disminuyeron sus errores de pronóstico con respecto al dominio de 9km, especialmente las ubicadas en la costa o próxima a ella.

## Referencias

- Adams, M. & Keith, D. 2007. *A wind farm parameterization for WRF*. Available: <[http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/WS2007/abstracts/5-5\\_Adams.pdf](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/workshops/WS2007/abstracts/5-5_Adams.pdf)>, [Consulted: November 14, 2016].
- Carnesoltas, M. 1986. *La circulación local de brisa en Cuba*. Tesis de Doctorado, La Habana, Cuba, 96 p.
- Carnesoltas, M. 2002. "La circulación local de brisa de mar y tierra. Conceptos fundamentales". *Revista Cubana de Meteorología*, 9(1): 43-72, ISSN: 0864-151X.
- Carrasco, D. M.; Roque, R. A.; Sánchez, M. O. & Rivas, D. 2011. "Local Breeze Effects on the Wind Energy Generation in the Northern Coast of Cuba". *Wind Engineering*, 35(6): 635-648.
- Claire, L. V. & Yubao, L. 2010. "A high resolution WRF model for wind energy forecasting". In: *EGU General Assembly Conference Abstracts*, vol. 12, Vienna, Austria, p. 2365, Available: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2010EGUGA..12.2365V>>, [Consulted: November 14, 2016].
- Draxl, C.; Hahmann, A.; Pena, D. A.; Nissen, J. N. & Giebel, G. 2010. *Validation of boundary-layer winds from WRF mesoscale forecasts with applications to wind energy forecasting*. Available: <[http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:59346/datastreams/file\\_5119388/content](http://orbit.dtu.dk/fedora/objects/orbit:59346/datastreams/file_5119388/content)>, [Consulted: November 14, 2016].
- Emeis, S. 2013. *Wind Energy Meteorology*. (ser. Green Energy and Technology), Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, ISBN: 978-3-642-30522-1, Available: <<http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-30523-8>>, [Consulted: November 14, 2016].

- GWEC. 2016. *Global Wind Report 2015*. Available: <<http://www.gwec.net/publications/global-wind-report-2/global-wind-report-2015-annual-market-update/>>.
- Lecha, L. B.; Paz, L. R. & Lapinel, B. 1994. *El clima de Cuba*. La Habana: Editorial Academia, ISBN: 978-959-02-0006-9.
- Magidi, S. 2013. "Determining the atmospheric stability classes for Mazoe in Northern Zimbabwe". *International Journal of Engineering Research and Applications*, 3(2): 178-181, ISSN: 2248-9622.
- Martínez, B. & Roque, A. 2015. "Disminución de la rapidez del viento en la capa superficial atmosférica. Su influencia del aprovechamiento eólico". *Revista Cubana de Meteorología*, 21(1): 49-61, ISSN: 0864-151X.
- Mesoscale & Microscale Meteorology Division 2014. *ARW Version 3 Modeling System User's Guide. Complementary to the ARW Tech Note*. Colorado, USA: NCAR: Boulder, 411 p., Available: <<http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/userguideV3/ARWUsersGuideV3.pdf>>.
- Mitrani, I.; Álvarez, L. & Borrajero, I. 2003. "Aplicación optimizada del MM5V3 sobre el territorio cubano mediante el uso de una computadora personal". *Revista Cubana de Meteorología*, 10(1), ISSN: 0864-151X.
- Mitrani, I.; Mitrani, C. & Borrajero, I. 2004. "El uso de MM5V3 en la predicción de eventos peligrosos sobre el territorio cubano". In: *Taller de Meteorología Tropical, TROPICO*, La Habana, Cuba, ISBN: 959-7167-02-6.
- Pasquill, F. 1961. "The estimation of the dispersion of windborne material". *Meteorol. Mag*, 90(1063): 33-49, ISSN: 0004-9743.
- Roque, A.; Ferrer, A.; Borrajero, I. & Sierra, M. 2015a. *Pronóstico de viento a corto plazo en torres de referencia meteorológica para el programa eólico cubano*. Informe Científico -Técnico, Instituto de Meteorología, p. 49.
- Roque, R. A.; Carrasco, D. M. & Reyes, M. P. 2015b. "Características del perfil vertical del viento en la capa superficial atmosférica sobre Cuba, atendiendo a la estratificación térmica de la atmósfera". *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 16(2): 189-200, ISSN: 1729-3790.
- Roque, R. A.; Sosa, N. Y.; Carrasco, D. M. & Reyes, M. P. 2015c. "Perfil vertical del viento en la capa superficial atmosférica sobre Cuba. Aplicación al estudio del viento como fuente de energía". *Revista Cubana de Meteorología*, 21(1), ISSN: 0864-151X, Available: <[https://www.researchgate.net/profile/Alfredo\\_Roque/publication/283500885\\_Perfil\\_vertical\\_del\\_viento\\_en\\_la\\_capa\\_superficial\\_atmosferica\\_sobre\\_Cuba\\_Aplicacion\\_al\\_estudio\\_del\\_viento\\_como\\_fuente\\_de\\_energia/links/563b6a5a08ae405111a75b22.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Alfredo_Roque/publication/283500885_Perfil_vertical_del_viento_en_la_capa_superficial_atmosferica_sobre_Cuba_Aplicacion_al_estudio_del_viento_como_fuente_de_energia/links/563b6a5a08ae405111a75b22.pdf)>, [Consulted: November 14, 2016].

- Sierra, M.; Ferrer, A. & Borrajero, I. 2014. *Sistema automático de predicción a mesoescala de cuatro ciclos diarios*. Proyecto: ‘Sistema de Predicción a muy corto plazo basado en el Acoplamiento de Modelos de Alta Resolución y Asimilación de Datos’, Instituto de Meteorología.
- Soltura, R.; Roque, A.; Rivero, I.; Wallo, A.; Báez, R.; Vázquez, R.; Rivero, R.; Ayala, L.; Rodríguez, G.; Carrasco, H.; Curbelo, A.; González, A.; Herrera, O.; Martín, G. & Díaz, J. 2006. *Mapa de potencial eólico de cuba. Aplicación de un modelo de microescala (Wasp)*. Informe Científico-Técnico, Instituto de Meteorología, p. 49.
- Storm, B. & Basu, S. 2010. “The WRF Model Forecast-Derived Low-Level Wind Shear Climatology over the United States Great Plains”. *Energies*, 3(2): 258–276, ISSN: 1996-1073, DOI: 10.3390/en3020258.
- Valdés, A.; Cruz, R. & Roque, A. 2015. “Evaluación del pronóstico del viento del modelo Weather Research Forecast (WRF) en torres de prospección eólica”. 21(2): 16–28, ISSN: 0864-151X.
- Yubao, L. 2010. “Improving short-term wind energy prediction with wind farm data using the NCAR WRFRTFDDA models”. In: *X EMS Annual Meeting and VIII ECAC*, Zurich, Switzerland, pp. 13–17, Available: <[http://www.emetsoc.org/fileadmin/ems/dokumente/annual\\_meetings/2010/AW14\\_Liu.pdf](http://www.emetsoc.org/fileadmin/ems/dokumente/annual_meetings/2010/AW14_Liu.pdf)>.
- Zelle, H.; Calkoen, C.; Groenewoud, P.; Hulst, S. & Mika, Á. 2010. “Wind energy forecasting for the Netherlands using the WRF atmosphere model”. In: *Conference on Applications of Meteorology (ECAM)*, vol. 1, Zürich, Switzerland, p. 793, Available: <<http://adsabs.harvard.edu/abs/2010ems.confE.793Z>>, [Consulted: November 14, 2016].