

Comparación de las salidas del modelo MM5v3 con datos observados en la Isla del Coco, Costa Rica

Fecha de recepción: 20/01/2010

Fecha de aceptación: 25/02/2010

Tito José Maldonado Mora¹

Eric José Alfaro Martínez²

Palabras clave

MM5, Isla del Coco, comparación observaciones-modelo, pronóstico del tiempo, América Central, Pacífico Tropical Oriental.

Resumen

Se presenta la comparación de las salidas del modelo MM5 con datos tomados *in situ* en la Isla del Coco, Costa Rica. Las observaciones fueron realizadas en tres expediciones hechas a la isla en octubre del 2007, abril del 2008 y marzo del 2009. Para ejecutar las simulaciones se utilizaron las salidas del modelo de tiempo atmosférico del National Center for Environmental Prediction (NCEP), que inició a las 00 UTC y se empleó la retroalimentación dinámica en ambas direcciones.

Se configuraron cuatro dominios de 90, 30, 10 y 3,3 km (42 x 47, 76 x 85, 100 x 121, 73 x 73 puntos) con 35 niveles en la vertical y con pronósticos de hasta 48 horas, cada tres horas. Se encontró que con las configuraciones físicas elegidas

se realiza una mejor representación de los periodos húmedos que de los periodos con mayor precipitación en dicha zona. Tales resultados se manifiestan en las predicciones de humedad relativa y precipitación, lo que confirma la relación entre estas dos variables en la zona.

Sin embargo, no se encontró una adecuada simulación de los patrones de radiación de onda corta incidente. La temperatura ha mostrado valores acordes con otros experimentos, mientras que el viento presentó una mejor simulación en los niveles medios que en capa límite.

Key words

MM5, Coco's Island, Central America, comparison observation-model, wheater forecast, Eastern Tropical Pacific.

Abstract

Outputs of regional climate model MM5 have been compared with observations *in situ* over Coco's Island, Costa Rica.

1. Centro de Investigaciones Geofísicas, Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología, Programa de Maestría en Ciencias de la Atmósfera, Universidad de Costa Rica. Teléfono: 2511-2553. Correo electrónico: tito.maldonado@ucr.ac.cr
2. Centro de Investigaciones Geofísicas, Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología, Escuela de Física, Universidad de Costa Rica. Teléfono: 2511-2553. Correo electrónico: erick.alfaro@ucr.ac.cr

La Isla del Coco se encuentra en una región de gran riqueza natural y es el núcleo central del Área de Conservación Marina Isla del Coco (ACMIC) en el Pacífico Tropical Oriental.

Observational data were collected during three different expeditions to the island, in October 2007, April 2008 and March 2009. The real time model forecast system for Coco's Island used a 4 domain grid configuration of 90, 30, 10, and 3,3 km horizontal resolutions (42x47, 76x85, 100x121, 73x73 points, respectively) with 35 vertical model layers.

The system generates forecasts up to 48 hours, every three hours. The model is initialized using the National Center for Environmental Prediction (NCEP) global forecast system (GFS) data as initial and lateral boundary conditions every six hours with two way nesting dynamics. No data assimilation are applied. The chosen physical configuration has shown better performance in the most humid periods than periods with high precipitation.

Such results are showed in relative humidity and precipitation forecasts, confirming the relationship among these variables in the zone. Nevertheless simulation of short wave radiation didn't show proper values for the region. Simulation of temperature was agreed with others experiments. Wind seems to be better simulated in middle levels than boundary layer.

Introducción

La Isla del Coco se encuentra en una región de gran riqueza natural y es el núcleo central del Área de Conservación Marina Isla del Coco (ACMIC) en el Pacífico Tropical Oriental (Amador, Alfaro, Lizano, Magaña y Kessler, 2006). Está localizada aproximadamente a 500 km de la costa Pacífica de Costa Rica y alrededor de los 87°W y 5.5°N (Lizano, 2008). Se caracteriza por presentar una alta precipitación, entre los 5000 mm y 7000 mm anuales (Garrison, 2005; Montoya, 2007; Alfaro, 2008).

Esta característica la diferencia de las demás islas del Pacífico Tropical Oriental

y hace que la vegetación terrestre sea exuberante (Cortés, 2008).

Debido a su lejanía y al difícil acceso a esta región, por muchos años las mediciones de las variables meteorológicas han sido escasas y dispersas (Alfaro, 2008). Dada tal situación, la elaboración de series de tiempo a partir de datos meteorológicos y oceanográficos globales, el uso de sensores remotos y los diferentes estudios de re-análisis (que utilizan modelos numéricos) han sido implementados en estudios recientes sobre esta región (e.g. Amador y colaboradores, 2006).

Alfaro (2008) explica la importancia de validar las series de tiempo obtenidas por otros métodos, tales como las obtenidas por modelos de reducción de escala (*downscaling*). Sin embargo, al comparar los datos observados con los resultados de un modelo, existe la posibilidad de que los datos observados estén incompletos, posean mucha incertidumbre o no estén en la misma escala del modelo (Tustison, Harris y Foufoula-Georgiou, 2001).

Por otra parte, los métodos de reducción de escala dinámica se utilizan con el objetivo de obtener información atmosférica de alta resolución, por lo general de 50 km o menos, a partir de los Modelos de Circulación General (MCG), los cuales son de baja resolución. Estos métodos utilizan modelos de área limitada de alta resolución (Modelo Climático Regional o MCR) con condiciones de frontera, como función del tiempo, derivadas de los MCG (Amador y Alfaro, 2009).

Tal reducción dinámica se puede aplicar a los MCG del tiempo atmosférico, como el Sistema de Pronóstico Global (GFS, por sus siglas en inglés) (Sela, 1982; 1988). La reducción de escala dinámica posee la ventaja de incorporar el estado de la cuestión de la física y la dinámica conocida del sistema climático, en especial cuando los resultados provienen de modelos acoplados que incluyen las

La adquisición de equipos de computación paralela en el Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica ha incentivado el estudio de las condiciones atmosféricas y climáticas mediante técnicas de reducción de escala dinámica.

interacciones tierra-océano-atmósfera. Dicho método requiere que el usuario posea un buen conocimiento del clima y de la variabilidad climática regional; además, generalmente se da una alta demanda computacional. Amador y Alfaro (2009) describen detalladamente las ventajas y desventajas del uso de este método en particular.

En las últimas décadas, el avance computacional ha permitido grandes mejoras en los modelos de predicción numérica. La adquisición de equipos de computación paralela en el Centro de Investigaciones Geofísicas de la Universidad de Costa Rica ha incentivado el estudio de las condiciones atmosféricas y climáticas mediante técnicas de reducción de escala dinámica. Mass, Ovens, Westrick y Colle (2002) discuten ampliamente las implicaciones que tiene al disminuir el espaciado de la grilla horizontal.

En América Central, los estudios realizados con este tipo de técnicas han sido escasos (e.g. Warner, Mapes y Xu, 2003; Tourigny y Jones, 2009; Rivera y Amador, 2009) y ha predominado la reducción de escala a partir de métodos estadísticos gracias a su bajo costo computacional (Rivera y Amador, 2009).

Por otra parte, debido a los problemas tanto de logística como económicos que representa la recopilación de datos en la Isla del Coco, resulta de suma importancia encontrar un modelo que represente adecuadamente las variables atmosféricas, ya que contribuye al estudio del sistema climático y a un mayor entendimiento de los aspectos oceanográfico-físicos del Pacífico Tropical Este (e.g. Amador y colaboradores, 2006; Fielder y Talley, 2006; Kessler, 2006; Willet, Leben y Lavin, 2006; Alfaro, 2008; Lizano, 2008), como biológicos (e.g. Ballance, Pitman y Fiedler, 2006; Fernández-Álamo y Färber-Lorda, 2006; Pennington, Mahoney, Kuwahara, Kolbert, Calienes y Chavez, 2006; Morales-Ramírez, 2008).

En este contexto, el objetivo del presente trabajo es comparar las predicciones hechas por un modelo regional con datos meteorológicos tomados *in situ* en la Isla del Coco. Tales observaciones fueron realizadas en tres expediciones a la isla como parte del proyecto *Conocimiento y gestión de los ambientes marinos y coralinos del Área de Conservación Marina Isla del Coco*, financiado por el Fondo Francés para el Medio Ambiente Mundial y la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica. Las misiones se realizaron del 10 al 17 de octubre del 2007, del 5 al 11 de abril del 2008 y del 27 de febrero al 7 de marzo del 2009.

Datos y metodología

Descripción del sistema de modelado

El modelo utilizado en este estudio es el Modelo de Mesoescala de quinta generación de la Universidad Estatal de Pensilvania-NCAR (MM5). Para más detalles puede consultarse a Duhia (1989, 1993) y a Grell, Duhia y Sauffer, (1994). El sistema de predicción en tiempo real para la Isla del Coco utilizó una configuración de cuatro dominios con rejillas, con una resolución horizontal de 90, 30, 10 y 3,3 km (42x47, 76x85, 100x121, 73x73 puntos, respectivamente; ver figura 1), con 35 niveles en la vertical.

El sistema genera pronósticos de hasta 48 horas, cada tres horas, una vez al día (a las 0 UTC se inicializan para los cuatro dominios). Para inicializar el modelo, se utilizaron datos en las fronteras laterales del sistema de pronóstico global GFS (Environmental Modeling Center, 2003), del National Center for Environmental Prediction (NCEP). Lo anterior se hizo cada seis horas y se empleó la retroalimentación dinámica en dos direcciones; sin embargo, no se empleó la asimilación de datos.

Las condiciones físicas elegidas en el modelo fueron:

- 1) El esquema de microfísica para hielo simple.
- 2) El enfriamiento radiativo en las nubes.
- 3) El esquema MRF (*Medium-Range Forecast*), que es un método eficiente basado en la representación del término de contra-gradiente de Treon-Mahrt y en el perfil K (gradiente local de viento y temperatura) de una capa límite bien mezclada (Hong y Pan, 1996) para la capa límite planetaria (PBL, por sus siglas en inglés).
- 4) No se aplica ningún esquema de parametrización de nubes en la escala de 3,3 km, pero se aplica a Grell en las escalas de 90, 30 y 10 km. Este último esquema se basa en la razón de desestabilización o cuasi-equilibrio, con un esquema simple de nubes-unitarias con flujos de subida y bajada que compensan el movimiento, lo que determina el perfil calor/humedad. También considera los efectos de la cortante y la eficiencia de precipitación (Grell y colaboradores, 1994).
- 5) Sin esquema de convección somera. Las coordenadas del punto de grilla para hacer la comparación son 5.55°N y 87.03°W.

El modelo se ejecutó en el Cluster Sibú-Ará del CIGEFI-UCR bajo plataforma Linux y mpi, la cual es una biblioteca con especificación para el paso de mensajes, diseñada para computación de alto rendimiento sobre máquinas en paralelo y en estaciones de trabajo tipo clusters (véase <http://www.mcs.anl.gov/research/projects/mpi/>, última visita 5/11/2009). Los componentes computacionales del cluster consisten en un servidor de alta velocidad con procesadores Opteron y 20 nodos interconectados por una red de alta velocidad (gigabit).

Cada nodo contiene dos procesadores Opteron con 2 GB de memoria distribuida, que dan un total de 42 procesadores y 44 GB de memoria para el sistema. Sibú-Ará posee un sistema de discos duros que pueden almacenar más de 2 terabytes de datos. Para asegurar la sostenibilidad del sistema, este se halla protegido por grupos de UPS conectados a un generador eléctrico automático. Puede encontrar más información en la página web http://www.cigefi.ucr.ac.cr/~isla-coco/index_coco2.html (última visita el 5/11/2009).

Datos observados

Las observaciones fueron recolectadas en tres diferentes expediciones realizadas a la Isla del Coco. El sistema de recolección usado en cada una de las giras se describe a continuación.

En cada expedición se instaló una cantidad distinta de estaciones, aunque en las tres misiones se coincidió con la estación localizada en Bahía Chatham, mientras que en la segunda y tercera expedición se contó con una estación adicional en Bahía Wafer. La ubicación de las estaciones se debió a que tanto el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) como el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) contaron alguna vez con estaciones en dichos lugares. El cuadro 1 muestra la descripción y localización de cada una de las estaciones por expedición.

Cuadro 1. Localización de las estaciones meteorológicas durante las expediciones realizadas a la Isla del Coco.

Localización	I-Exp	II-Exp	III-Exp	Coordenadas y altura sobre la superficie
Bahía Chatham	X	X	X	5° 32' 50.82" N
				87° 02' 43.26" W
				142 msnm
Bahía Wafer		X	X	5° 32' 23.5" N
				87° 03' 25.9" W
				132 msnm
Barco		X	X	5° 33' 08.7" N
				87° 02' 22.2" W
				9.28 msnm

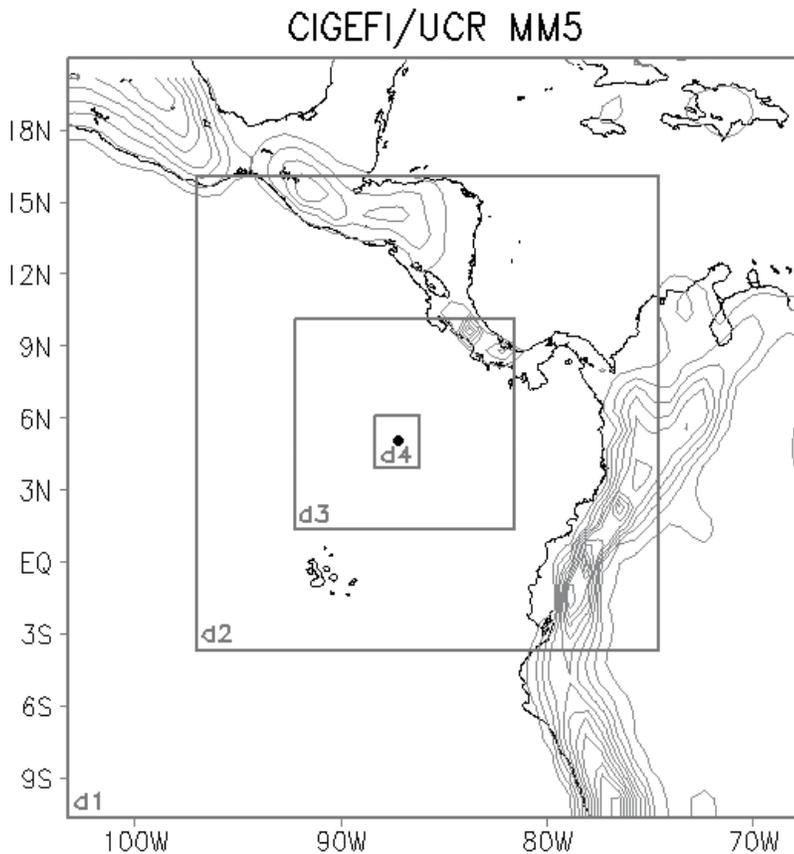


Figura 1. Esquema de los dominios seleccionados para las predicciones realizadas en los periodos de las expediciones a la Isla del Coco. La comparación se realizó con el dominio 4 (d4). El punto representa la localización de la isla.

En la expedición Cimar-Coco I se instaló una estación automática marca Campbell, tipo CR10X. Las variables medidas fueron: temperatura superficial del aire, humedad relativa, radiación solar máxima, radiación solar mínima, radiación solar total, precipitación, rapidez del viento, magnitud de la velocidad del viento, dirección de la velocidad del viento, desviación estándar de la dirección de la velocidad del viento y presión superficial. La medición de las variables se realizó cada 5 minutos, inició el 12 de octubre del 2007 a las 12:30 p.m. y finalizó el 17 de octubre del 2007 a las 2:40 p.m.

Las misiones Cimar-Coco II y Cimar-Coco III contaron con dos estaciones automáticas marca Davis, tipo Vantage Pro Plus. Las variables que se midieron con estas estaciones fueron: temperatura superficial del aire, humedad relativa, radiación solar, precipitación, rapidez del viento, dirección de la velocidad del viento y presión superficial. Para la segunda expedición los periodos de medición fueron: en Bahía Chatham, del 5 de abril del 2008 a las 9:40 a.m. al 11 de abril del 2008 a las 6:10 a.m.; en Bahía Wafer, del 5 de abril del 2008 a las 4:00 p.m. al 10 de abril del 2008 a las 2:30 p.m. En la tercera expedición, los tiempos de observación fueron: en Bahía Chatham, del 1 de marzo del 2009 a las 11:05 a.m. al 6 de marzo del 2009 a las 12:45 p.m.; mientras que en Bahía Wafer se midió del 1 de marzo del 2009 a las 4:00 p.m. al 6 de marzo del 2009 a las 8:55 a.m. La medición de las variables se realizó cada 5 minutos.

En estas misiones también se utilizaron estaciones portátiles Kestrel 4500 NV, ubicadas en el buque *Adventure*. Las variables que se midieron con este tipo estación fueron: temperatura superficial del aire, humedad relativa, magnitud de la velocidad del viento, dirección de la velocidad del viento y presión superficial. En el caso de la segunda misión, solo se contó con una estación en dicho barco. Las mediciones se realizaron cada 10 minutos, del 5 de abril del 2008 a las 8:40 p.m. al 8 de abril del 2008 a las 4 p.m., y a partir de ese momento se llevaron a cabo cada 2 minutos hasta el 11 de abril del 2008 a las 8:02 a.m.

En la última expedición Cimar-Coco III se usaron dos estaciones portátiles Kestrel 4500 NV, las cuales se ubicaron en el buque *Adventure*, a 9 y 7 msnm. La primera estaba expuesta al sol y la segunda a la sombra. Las mediciones se realizaron cada 2 minutos, del 2 de marzo del 2009 a las 12:12 p.m. al 6 de marzo del 2009 a las 2:24 p.m.

Método de comparación

Para comparar las salidas del modelo se han utilizado los siguientes estadísticos: coeficiente de correlación de Pearson, la desviación media absoluta (DMA), definida como:

$$DMA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |M_i - O_i| \quad (1)$$

y sesgo

$$Sesgo = \bar{M} - \bar{O} \quad (2)$$

donde M representa los valores estimados por el modelo y O los datos observados. Se escogieron estos estadísticos porque, en el caso de la correlación, se obtiene información sobre la covarianza que tendrían los pronósticos con las observaciones, mientras que la DMA estima el promedio de la diferencia entre los datos modelados y los observados, similar a calcular la dispersión de los datos en cada hora de pronóstico, es decir, nos da una medición de qué tan cercanos o lejanos fueron los resultados del modelo con respecto a lo observado.

Por último, el sesgo da información sobre la tendencia del modelo a sobrestimar o subestimar las predicciones, o como en el caso de las componentes del viento, brinda una medida de la dirección de tendencia. Como un ejemplo de lo anterior, en las figuras 2 y 3 se graficaron los resultados para la humedad relativa y la magnitud del viento correspondientes a la expedición de octubre del 2007. En los resultados de precipitación en la hora 18 del cuadro

3, se encuentra una DMA de 5,56mm; sin embargo, el modelo sobrestima el pronóstico en 3.41mm.

Si se da el caso en que la DMA y el sesgo presentan el mismo valor, podría ocurrir que los valores M_i no tendrían mucha dispersión con respecto al valor medio, lo que provocaría que la diferencia $M_i - O_i$ promedio sea igual a la diferencia de los promedios. Un ejemplo de los resultados de presión puede verse en el cuadro 3.

Para asignar significado a de cada estadístico, se utilizaron las siguientes pruebas: error estándar según Davis (1976) para la correlación y una prueba T de *student* (Wilks, 2006) para el caso de la DMA y el sesgo.

Los niveles de significación escogidos en ambas pruebas fueron, de menor a mayor, al 90%, 90-95%, 95%-99% y mayor al 99%. Debido a que los intervalos de tiempo de las mediciones eran de minutos, se promedió el valor media hora antes y media hora después, cada tres horas, tomando en cuenta únicamente las horas que coinciden con las del pronóstico.

Además, se tuvo presente el traslape de días con las horas de pronóstico, puesto que el modelo inicia la predicción a las 0 UTC, las horas que van de las 6 a 27 de predicción corresponden a las horas que van de la 0 a la 21 de la observación del día actual, mientras que de la 30 a la 45 de predicción del día anterior corresponden a las que comprenden de la 0 a la 15 del día actual (cuadro 2). No se toman en cuenta las horas iniciales 0 y 3 debido a

Cuadro 2. Correspondencia de las horas de pronóstico con respecto a las horas de observación.
Modelo a) pronóstico para el mismo día de la observación
Modelo b) pronóstico para el día anterior al día de la observación

Hora observada	0	3	6	9	12	15	18	21
Hora modelo a)	6	9	12	15	18	21	24	27
Hora modelo b)	30	33	36	39	42	45		

Debido a que los intervalos de tiempo de las mediciones eran de minutos, se promedió el valor media hora antes y media hora después, cada tres horas, tomando en cuenta únicamente las horas que coinciden con las del pronóstico.

Cuadro 3. Valores estadísticos calculados entre los datos observados y los simulados por el modelo Expedición I-2007

Estación: Bahía Chatham

Simbología: itálica 90-95%, negrita 95-99%, negrita + itálica 99%

	Hora de simulación	6,00	9,00	12,00	15,00	18,00	21,00	24,00	27,00	30,00	33,00	36,00	39,00	42,00	45,00
Humedad relativa	Correlación	-0,11	0,07	0,38	0,62	0,43	-0,31	0,29	0,61	0,75	0,30	0,65	0,92	0,91	0,94
	Desv. med abs.	15,91	14,81	15,16	10,05	8,01	11,11	11,75	8,69	8,40	7,90	5,36	2,13	4,36	2,30
	Sesgo	-15,91	-14,81	-15,16	-10,05	-7,18	-2,36	-7,38	-7,38	-8,40	-8,40	-5,18	-4,99	-0,16	4,06
Precipitación	Correlación	-0,17	0,95	0,50	-0,31	-0,32	-0,10	0,68	0,68	0,64	0,84	0,82	0,83	-0,07	0,49
	Desv. med abs.	0,28	0,70	<i>0,98</i>	0,82	5,16	1,17	23,54	29,65	33,24	37,10	39,48	62,68	71,74	68,10
	Sesgo	-0,28	-0,70	-0,98	-0,82	3,41	0,47	23,51	29,65	33,24	37,10	39,48	62,68	71,74	67,90
Presión	Correlación	0,87	0,68	-0,05	-0,47	0,02	0,94	0,71	0,74	0,19	-0,29	-0,12	-0,89	-0,81	0,42
	Desv. med abs.	15,86	17,17	16,23	15,28	16,17	17,74	16,61	15,46	16,17	16,83	15,42	14,91	15,71	17,17
	Sesgo	15,86	17,17	16,23	15,28	16,17	17,74	16,61	15,46	16,17	16,83	15,42	14,91	15,71	17,17
Temperatura	Correlación	0,91	0,24	-0,25	-0,29	-0,06	0,42	-0,01	0,38	-0,19	0,87	0,43	0,15	-0,40	-0,83
	Desv. med abs.	2,70	2,99	2,74	1,31	1,36	1,54	2,72	2,84	2,88	2,96	3,02	1,34	1,34	1,64
	Sesgo	2,70	2,99	2,74	1,31	1,01	1,54	2,72	2,84	2,88	2,96	3,02	1,34	1,03	1,64
Radiación	Correlación	-	-	-	0,87	0,50	0,93	-	-	-	-	-	0,40	0,09	0,32
	Desv. med abs.	0,00	0,00	5,46	218,59	392,04	212,57	0,41	0,00	0,00	0,00	5,46	326,88	636,35	414,17
	Sesgo	0,00	0,00	-5,46	209,16	392,04	192,39	-0,41	0,00	0,00	0,00	-5,46	325,81	635,32	414,17
u	Correlación	-0,22	0,55	0,74	0,75	0,84	-0,51	-0,93	0,12	0,29	0,41	0,22	0,88	-0,10	-0,66
	Desv. med abs.	1,84	1,75	2,27	2,54	3,22	2,01	3,23	3,08	3,21	3,28	5,33	2,53	4,47	4,62
	Sesgo	1,84	1,75	2,16	1,63	2,26	0,76	0,67	0,54	2,41	1,74	0,45	1,04	3,22	1,46
v	Correlación	0,40	0,19	-0,02	-0,67	-0,58	0,99	-0,16	-0,23	-0,59	-0,36	-0,53	0,19	-0,35	0,33
	Desv. med abs.	2,41	2,83	3,18	2,98	3,21	2,69	3,06	2,79	3,86	3,28	5,22	4,77	4,75	3,11
	Sesgo	-2,41	-2,76	-3,04	-2,60	-2,14	-1,63	-2,92	-2,79	-3,67	-1,33	-5,22	-4,39	-4,75	-2,64
Magnitud del viento	Correlación	-0,16	-0,27	0,29	0,21	0,11	0,04	-0,22	-0,24	0,04	-0,32	0,43	-0,69	-0,16	-0,36
	Desv. med abs.	1,84	1,75	2,27	2,54	3,22	2,01	3,23	3,08	3,21	3,28	5,33	2,53	4,47	4,62
	Sesgo	1,84	1,75	2,16	1,63	2,26	0,76	0,67	0,54	2,41	1,74	0,45	1,04	3,22	1,46

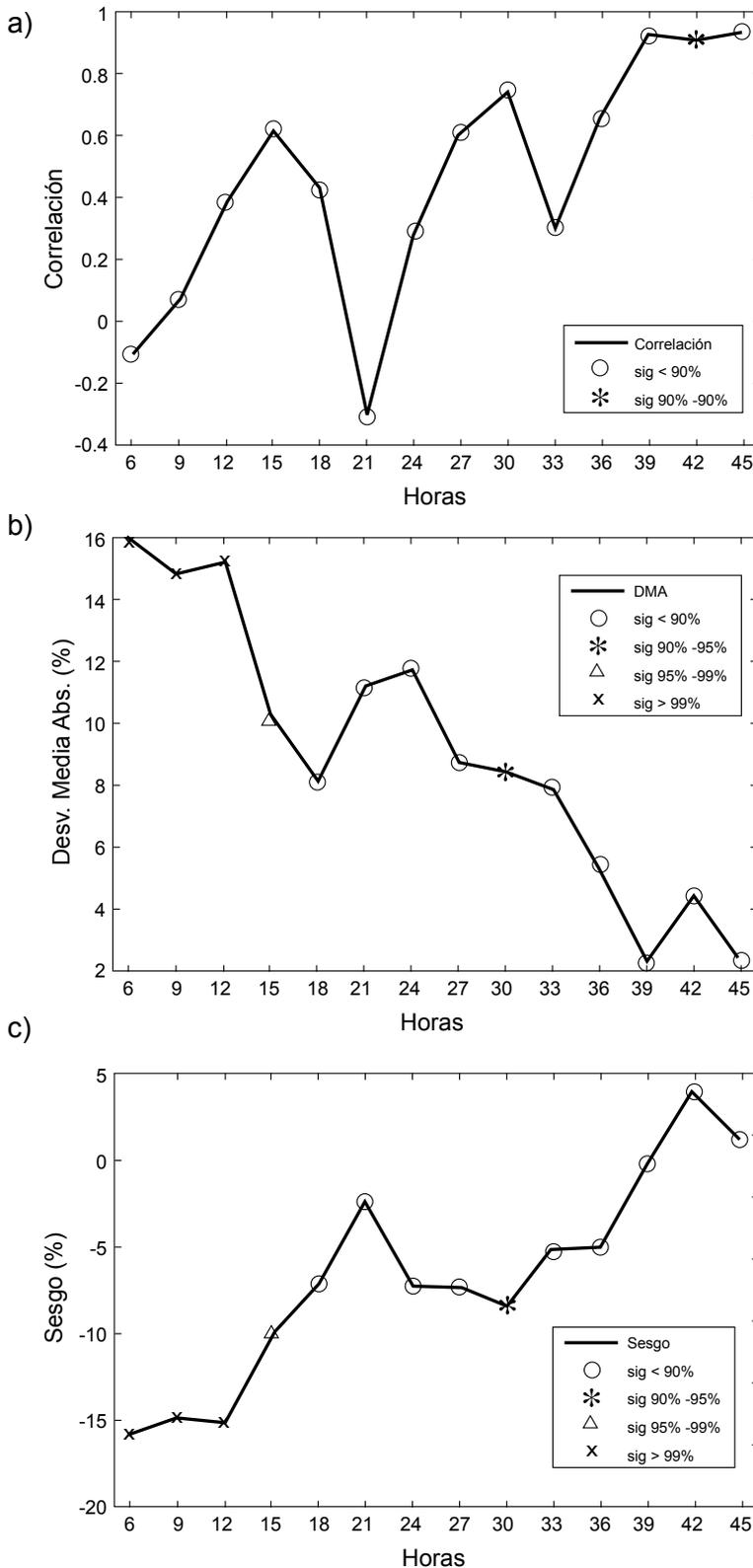


Figura 2. Estadísticos calculados entre los pronósticos de humedad relativa del modelo MM5 y las observaciones realizadas durante la expedición Cimar-Coco I, en octubre del 2007: a) correlación, b) DMA y c) sesgo.

que el modelo no tiene estabilidad en esas predicciones.

Los datos de viento en superficie se ajustaron a una altura de 10 m sobre la superficie por medio de

$$U_{10} = \frac{U_z}{\left(\frac{z}{10}\right)^p} \quad (3)$$

donde U_z es el valor de la magnitud del viento medido en las estaciones, z el valor de altura de los sensores de viento y $p=0,15$. Esto se hace debido a que los valores de esta variable calculados por el modelo están a 10 m de altura, mientras que las observaciones fueron realizadas a distintas alturas en superficie. En la primera expedición, el sensor estaba a una altura de 3,65 m. En la segunda, los sensores estaban a 3,28 m (B. Chatham), 3,31m (B. Wafer) y 1,98 m (Barco); y en la tercera, las alturas fueron de 3,12 m, 3,20 m y 1,80 m con el mismo orden anterior respecto a sus ubicaciones.

También se realizaron mediciones del viento en altura por medio del lanzamiento de globos piloto desde Bahía Chatham durante Cimar-Coco-I y II, a los cuales se les dio seguimiento por medio de un teodolito meteorológico.

Estas observaciones son interpoladas por medio de una regresión lineal simple, conformada por los dos puntos más cercanos del modelo con las alturas registradas en los globos. Las horas que se escogen del modelo para comparar son las horas de predicción que están antes de la hora observada, la hora del modelo que corresponde a la hora de la medición (en el caso de que esta sea múltiplo de 3 o cercana a un múltiplo) y la hora del modelo que está después de la observada. Los niveles en altura del modelo se convirtieron de coordenadas sigma (σ) a coordenadas z por medio de la ecuación

$$z = -\frac{R}{g} \left[T_{SF\text{CO}} \ln\left(\frac{P_0}{P_{00}}\right) + \frac{A}{2} \ln^2\left(\frac{P_0}{P_{00}}\right) \right] \quad (4)$$

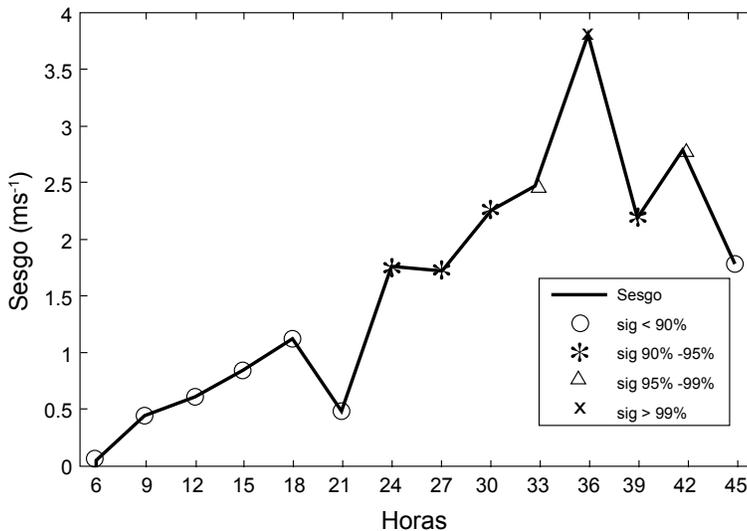
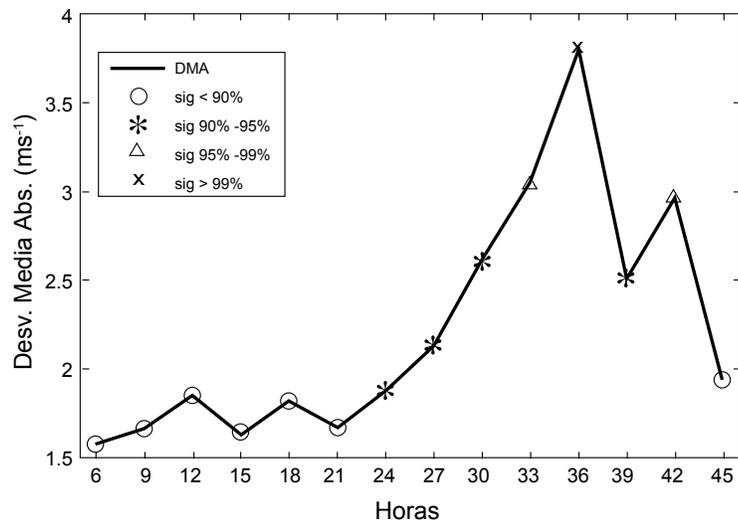
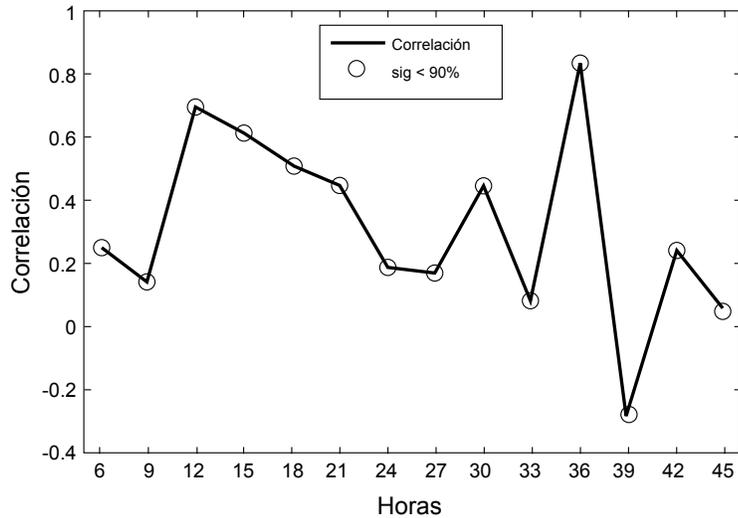


Figura 3.

donde p_{00} es la presión a nivel del mar, referenciada a 105 Pa. T_{SFC0} es la temperatura al nivel de p_{00} , cuyo valor en los trópicos es igual a 300 K. La presión en la elevación z es p_0 . La constante A representa la diferencia entre p_{00} y p_{00}/e , que usualmente corresponde a unos 50 K, y R es la constante de los gases, que utiliza el valor de $8,314472 \text{ J K}^{-1}\text{mol}^{-1}$. Estos resultados se comparan por medio de perfiles de viento en altura (se muestran las figuras más representativas), no se aplicaron los estadísticos descritos anteriormente debido a la falta de una serie de tiempo.

También se definieron tres niveles en altura para comparar los datos por medio del sesgo; estos son: capa límite o nivel bajo, que cubre de los 0 a los 1000m, un nivel medio de los 1000-6000 m y un nivel alto, que va de los 6000 a los 10000 m; sin embargo, debido a que los teodolitos mostraron pérdida de calidad de los datos después de los 5000 m en la primera expedición, sólo se utilizan para hacer esta comparación con los niveles bajo y medio (cuadro 6 a, b).

Resultados

Primera expedición, Cuadro 3

Precipitación: con respecto a la precipitación, se encontró la existencia de dos momentos en los cuales se presenta una alta correlación: el primero es a las 9 horas y el segundo se localiza entre las 24 y las 39 horas de predicción. Además, se observa que el modelo tiene una tendencia a sobrestimar los pronósticos con el paso del tiempo. Esta sobrestimación alcanza valores aproximados a los 60 mm, y presenta altas DMA y sesgos positivos en horas de buena correlación.

Temperatura: se encontraron altas correlaciones a las 6 y 33 horas, y alta correlación negativa a las 45 horas. En general, el modelo sobrestima los valores

de temperatura con una diferencia entre 1 y 3 °C.

Humedad relativa: se muestran tres picos de alta correlación localizados a las 15 y 30 horas, y una correlación casi igual a partir de las 39 horas de predicción. La DMA disminuye con el paso de las horas de predicción; por otra parte, las salidas muestran valores subestimados, con excepción de las horas finales donde se encuentran los valores sobrestimados, al igual que los valores más bajos de DMA, aproximadamente un 2%.

Viento: la mayor parte de las horas muestra una baja correlación de la magnitud. Se encontró mayor correlación (negativa) a las 39 horas. Otra característica importante que presentan las salidas es que existe una DMA que alcanza los $3,5 \text{ ms}^{-1}$; sin embargo, se encuentra una ligera sobrestimación con valores mínimos cerca de las horas de menor correlación, de las 6 a las 21 horas. Mientras, la componente zonal u presenta altas correlaciones a las 12, 15, 18 y 39 horas, y en la hora 24 muestra una alta anticorrelación. La componente meridional v solamente presenta un buen resultado a las 21 horas. En dichas horas de alta correlación, estas variables presentaron una desviación del orden de los 3 ms^{-1} , que resulta ser un sesgo positivo en la primera componente y un sesgo negativo en la última.

Presión: se obtuvieron altos valores de correlación a las 6 horas y de las 21 a las 27 horas. Los resultados también mostraron una alta anticorrelación a las 39 y 42 horas del pronóstico. La DMA presenta valores del rango de los 15 a los 17h Pa. Otra característica de estos resultados es que los valores más pequeños de la desviación media absoluta (aprox. 15 hPa) se localizaron en las horas de mayor correlación negativa. Asimismo, esos resultados muestran una clara tendencia a sobrestimar los pronósticos.

Radiación: los resultados muestran que en las horas donde correlacionaron mejor los pronósticos con las observaciones fueron las 15 y las 21 horas, donde se registró una desviación de aproximadamente unos 200 Wm^{-2} , con valores sobrestimados por parte del modelo.

Segunda expedición Cuadros 4a, b y c

Precipitación: en las estaciones emplazadas en tierra se encontró que los resultados presentan una alta correlación, casi similar, en la hora 39 de pronóstico. La estación de Chatham registró una buena correlación entre las 27 y las 30 horas, y una correlación negativa a las 6 horas. En ambas estaciones en tierra se observó un incremento de la DMA con tendencia a sobrestimar por parte del modelo. La diferencia máxima alcanzada es de unos 80 mm.

Temperatura: en las tres estaciones, las salidas del modelo muestran que en la mayoría de las horas entre las 6 y las 21 hay una anticorrelación. Luego de dicho periodo, este estadístico presenta un leve incremento positivo cerca de las 36 horas, donde se sufre una fuerte reversión y vuelve a anticorrelacionar. En las últimas tres horas de predicción se volvió a encontrar una alta correlación. Los análisis muestran que durante las primeras horas la DMA en las tres estaciones es del orden de los $2,5^\circ\text{C}$. En la estación localizada en el barco y en Bahía Chatham se encontró que la hora 24 presentó la menor diferencia, sin embargo, en Bahía Wafer la menor diferencia; fue a la hora 27, cercana a 1°C .

Otra característica en común que presentaron las dos primeras estaciones fue una sobrestimación de la temperatura en las primeras horas de predicción. Luego, entre las horas 15 y 24, los valores fueron subestimados. Por otro lado, la última estación mostró al inicio un comportamiento similar a las anteriores, pues en las primeras horas la desviación

Cuadro 4A. Valores estadísticos calculados entre los datos observados y los simulados por el modelo

Expedición II-2008

Significancia: itálica 90-95%, negrita 95-99%, negrita + itálica 99%

Estación: Bahía Chatham

	Hora de simulación	6,00	9,00	12,00	15,00	18,00	21,00	24,00	27,00	30,00	33,00	36,00	39,00	42,00	45,00
Humedad relativa	Correlación	-0,32	-0,29	-0,28	0,39	-0,01	-0,59	0,58	0,11	0,53	0,32	-0,19	0,75	0,66	0,00
	Dev. med abs.	14,69	15,08	13,62	7,24	9,30	8,59	8,02	9,52	8,87	8,54	8,50	5,17	6,85	6,95
Precipitación	Sesgo	-14,69	-15,08	-13,62	-6,75	-3,42	2,44	-2,83	-7,12	-8,70	-7,26	-7,30	0,05	2,65	5,31
	Correlación	-0,82	-	-	-0,25	-0,39	-0,35	-	0,48	0,68	-	-	0,83	0,24	-0,16
Presión	Dev. med abs.	2,49	0,00	0,00	4,31	11,44	11,34	28,76	25,70	38,48	46,01	40,46	59,19	65,46	76,42
	Sesgo	-2,49	0,00	0,00	-4,31	-2,87	10,26	28,76	25,70	38,48	46,01	40,46	59,19	65,46	76,42
Temperatura	Correlación	0,97	0,83	0,77	0,74	0,88	0,91	0,65	0,21	0,96	0,82	0,87	0,83	0,83	0,88
	Dev. med abs.	15,86	17,15	16,37	15,28	15,88	17,38	16,35	15,03	16,46	17,28	16,12	15,42	16,18	17,14
Temperatura	Sesgo	15,86	17,15	16,37	15,28	15,88	17,38	16,35	15,03	16,46	17,28	16,12	15,42	16,18	17,14
	Correlación	<u>-0,68</u>	-0,20	-0,21	-0,16	-0,41	-0,09	0,68	0,13	0,24	-0,39	-0,77	0,70	0,06	-0,01
Temperatura	Dev. med abs.	3,18	3,13	2,57	2,00	2,93	1,44	1,21	1,81	1,93	1,86	1,77	2,17	2,97	1,97
	Sesgo	3,18	3,13	2,57	-0,36	-0,64	-1,31	0,60	1,81	1,66	1,54	1,77	-1,60	-1,87	-1,97
Radiación	Correlación	-	-	-0,52	0,04	0,00	0,81	-0,25	-	-	-	-0,52	0,62	0,47	-0,35
	Dev. med abs.	0,00	0,00	28,58	248,24	433,92	150,26	5,61	0,00	0,00	0,00	28,58	282,76	306,36	248,05
u	Sesgo	0,00	0,00	-28,58	78,12	29,59	-72,35	-5,61	0,00	0,00	0,00	-28,58	-282,76	-158,23	-189,75
	Correlación	0,56	0,46	0,72	0,76	0,68	0,88	0,74	0,04	0,86	0,68	0,87	0,38	0,71	0,74
v	Dev. med abs.	1,88	1,88	2,31	2,69	2,94	2,23	2,99	3,35	2,83	3,37	4,58	3,29	3,49	3,97
	Sesgo	1,80	1,88	2,17	2,07	2,42	1,60	1,54	1,56	1,26	0,64	1,03	0,33	1,85	2,04
Magnitud del viento	Correlación	0,15	0,53	0,64	-0,01	-0,15	0,03	0,26	0,14	0,29	0,35	0,80	-0,08	-0,02	-0,18
	Dev. med abs..	1,38	1,70	1,79	2,16	2,25	2,76	2,53	2,47	2,35	2,21	2,87	2,79	3,05	1,88
Magnitud del viento	Sesgo	-1,14	-1,50	-1,44	-0,65	0,71	0,16	-1,83	-1,82	-2,01	-0,17	-2,87	-1,93	-2,46	-0,29
	Correlación	0,01	-0,22	-0,21	0,20	-0,40	-0,91	-0,44	-0,11	0,13	0,22	-0,37	0,53	0,02	-0,54
Magnitud del viento	Dev. med abs.	1,50	2,08	2,67	2,64	3,33	3,34	3,23	3,51	3,23	3,79	4,70	3,95	4,18	4,02
	Sesgo	1,29	1,98	2,34	2,64	3,17	3,33	3,23	3,51	3,23	3,79	4,70	3,95	4,18	4,02

Cuadro 4B. Valores estadísticos calculados entre los datos observados y los simulados por el modelo Expedición II-2008
 Simbología: itálica 90-95%, negrita 95-99%, negrita + itálica 99%
 Estación: Bahía Wafer

	Hora de simulación	6,00	9,00	12,00	15,00	18,00	21,00	24,00	27,00	30,00	33,00	36,00	39,00	42,00	45,00
Humedad relativa	Correlación	0,29	0,02	0,35	0,51	0,15	0,54	0,43	0,51	0,37	0,84	0,35	0,78	0,57	0,67
	Desv. med abs.	8,12	9,09	9,19	6,15	9,90	2,65	9,03	6,65	6,21	6,95	6,70	5,63	6,83	5,79
	Sesgo	-8,12	-9,09	-9,19	-5,87	-4,15	-1,52	1,20	-1,22	-3,75	0,18	-2,50	-2,79	2,61	2,92
Precipitación	Correlación	-	-	-	-0,25	-0,34	-0,33	-	-	-	-	-	0,83	-0,01	-0,17
	Desv. med abs.	0,00	0,00	0,00	1,98	4,69	1,18	19,40	29,83	33,52	37,80	40,46	61,52	72,22	68,10
	Sesgo	0,00	0,00	0,00	-1,98	3,88	0,67	19,40	29,83	33,52	37,80	40,46	61,52	72,22	68,10
Presión	Correlación	0,95	0,88	0,80	0,76	0,97	0,93	0,76	0,91	0,95	0,82	0,95	0,73	0,91	0,98
	Desv. med abs.	10,82	12,27	11,41	10,29	10,76	12,36	11,51	10,41	11,16	11,00	11,93	12,08	10,29	9,97
	Sesgo	10,82	12,27	11,41	10,29	10,76	12,36	11,51	10,41	11,16	11,00	11,93	12,08	10,29	9,97
Temperatura	Correlación	-0,68	-0,47	-0,35	-0,02	-0,10	0,32	0,47	0,55	0,19	0,41	-0,21	0,71	0,68	0,76
	Desv. med abs.	2,27	2,39	2,23	1,30	2,15	1,17	1,27	0,96	1,47	1,22	1,43	1,10	1,71	2,03
	Sesgo	2,27	2,39	2,23	0,64	0,49	-1,14	0,37	0,94	0,93	0,76	1,43	-0,60	-0,49	-2,03
Radiación	Correlación	-	-	-0,28	-0,04	0,07	0,84	-0,72	-	-	-	-0,28	0,37	0,68	-0,61
	Desv. med abs.	0,00	0,00	21,72	255,05	436,83	114,90	10,75	0,00	0,00	0,00	21,72	217,11	225,72	317,97
	Sesgo	0,00	0,00	-21,72	230,29	187,76	-85,15	-10,75	0,00	0,00	0,00	-21,72	-130,59	20,33	-288,25
u	Correlación	0,50	0,26	0,36	0,98	0,83	0,78	0,80	0,81	0,47	0,11	0,96	0,69	0,69	0,88
	Desv. med abs.	1,62	1,54	1,99	1,96	2,01	1,85	2,90	2,87	2,67	3,74	4,71	2,77	3,31	3,63
	Sesgo	1,53	1,54	1,67	1,20	1,02	0,28	0,85	0,65	0,50	0,97	0,97	-0,67	1,14	0,35
v	Correlación	0,36	0,68	0,79	-0,09	0,03	0,07	-0,92	-0,08	0,05	0,78	0,58	0,68	-0,10	0,35
	Desv. med abs.	1,30	2,02	1,84	2,20	2,52	2,03	2,64	2,33	1,96	1,40	2,92	2,87	2,96	1,66
	Sesgo	-1,04	-1,52	-1,33	-0,52	0,85	0,18	-1,41	-1,48	-1,10	0,95	-2,92	-2,06	-2,80	1,07
Magnitud del viento	Correlación	0,48	0,22	0,53	0,86	0,52	0,92	0,82	-0,20	0,07	-0,15	-0,28	0,82	0,91	0,99
	Desv. med abs.	1,62	2,00	2,21	2,55	2,69	2,34	3,53	3,37	3,35	3,91	4,87	3,88	4,42	3,34
	Sesgo	1,62	2,00	2,21	2,55	2,69	2,34	3,53	3,37	3,35	3,91	4,87	3,88	4,42	3,34

Cuadro 4C. Valores estadísticos calculados entre los datos observados y los simulados por el modelo Expedición II-2008
Simbología: itálica 90-95%, negrita 95-99%, negrita + itálica 99%
Estación: Barco

	6,00	9,00	12,00	15,00	18,00	21,00	24,00	27,00	30,00	33,00	36,00	39,00	42,00	45,00
Humedad relativa														
Correlación	-0,05	0,30	0,52	0,21	-0,15	-0,05	0,51	0,61	0,84	0,51	0,80	0,65	0,63	0,90
Desv. med abs.	3,70	3,01	2,79	11,72	12,08	17,12	10,93	4,86	5,77	6,97	6,47	15,18	13,23	20,67
Sesgo	-0,28	-1,92	-1,94	8,86	5,17	17,12	10,51	3,31	5,77	6,02	6,47	15,18	13,23	20,67
Presión														
Correlación	0,09	-0,27	-0,50	0,70	0,35	0,75	0,43	-0,01	-0,34	-0,58	-0,48	-0,17	0,75	0,80
Desv. med abs.	0,74	2,26	2,29	1,17	3,45	1,82	0,79	0,91	0,87	2,58	1,99	1,68	2,86	1,25
Sesgo	-0,50	0,23	-0,59	0,71	2,47	1,82	0,79	-0,66	-0,16	0,11	-1,25	0,38	2,27	1,25
Temperatura														
Correlación	-0,03	-0,34	0,67	-0,36	-0,26	-0,24	0,76	0,39	0,42	0,20	0,17	0,63	0,49	0,98
Desv. med abs.	2,24	2,45	2,19	1,43	1,82	1,26	0,85	1,53	1,26	1,28	1,19	1,36	1,45	1,67
Sesgo	2,24	2,45	2,19	-0,31	0,77	-1,26	-0,28	1,53	0,81	0,93	1,19	-1,14	-0,18	-1,67
u														
Correlación	0,03	-0,49	-0,08	0,68	0,64	0,94	0,65	0,29	0,36	0,18	0,81	0,37	0,69	0,68
Desv. med abs.	1,54	1,31	2,27	2,10	1,85	1,40	2,66	2,94	3,00	3,89	4,97	3,02	3,18	3,85
Sesgo	-0,39	-0,11	-0,28	-1,62	-0,78	-0,30	-0,50	-1,78	-0,55	-1,15	-2,11	-1,80	-0,43	0,40
v														
Correlación	0,47	-0,46	-0,42	0,89	-0,32	-0,41	-0,38	0,94	-0,17	0,74	0,49	-0,25	0,63	0,14
Desv. med abs.	1,02	1,90	2,02	2,45	2,81	2,86	2,48	1,56	2,48	2,34	2,73	2,97	2,57	2,08
Sesgo	0,15	-0,15	-0,03	-0,23	2,02	1,53	-0,90	-0,50	-0,82	0,73	-2,48	-1,04	-1,63	0,51
Magnitud del viento														
Correlación	-0,13	-0,54	-0,14	0,91	0,64	0,64	0,07	0,81	0,02	0,13	0,49	-0,01	0,83	0,30
Desv. med abs.	1,12	1,49	1,84	1,45	1,30	2,24	2,36	1,31	2,51	2,71	3,99	3,19	3,19	3,34
Sesgo	0,14	0,89	1,21	1,45	1,15	2,04	2,36	1,31	2,32	2,71	3,99	3,05	3,19	3,34

fue mayor pero disminuyó con el paso de las horas y alcanzó la menor a las 27. Inicialmente se dio una sobrestimación que decae hasta las 21 horas, cuando se presentó una subestimación. De las 24 a las 36 se vuelven a presentar pronósticos sobrestimados.

Humedad relativa: en todas las estaciones se encontró que las horas iniciales presentan baja correlación, en general, desde la hora 6 hasta la 21. Los resultados mejoran un poco a partir de las 24 horas. Las DMA muestran que en la estación ubicada en el barco hay dos periodos en los cuales el estadístico tiene una pequeña diferencia, que va de las 6 a las 12 y de las 27 a las 36 horas. De las 12 a las 27 horas, así como en las últimas tres horas de predicción, se presentaron los valores más altos. Las estaciones de Bahía Chatham y Wafer muestran una tendencia a disminuir en el rango de las 21 a las 39 horas y presenta los valores más pequeños a las 24 y 27 horas, respectivamente, para cada estación.

Además, de acuerdo con el sesgo obtenido, prácticamente en todas las estaciones se observó que el modelo tiende a sobrestimar dos periodos bien marcados: el primero durante las 3 horas iniciales de predicción y el segundo en el rango de las 24 a las 39 horas. También se obtuvo una subestimación en las horas cercanas a la 21 y de las 39 a las 45 horas.

Viento: la magnitud del vector tiene altos valores de correlación: a las 21 en Chatham; a las 15, 21, 24, 36, 39 y 42 en Wafer; y a las 15, 27 y 42 en el barco. El resto del tiempo se presentó una baja correlación. En general se encontró que en las tres estaciones la desviación media absoluta se incrementa con el avance de las horas del pronóstico y alcanzó una diferencia máxima de 5 ms^{-1} .

La situación es similar con los resultados calculados a partir del sesgo, los cuales muestran que el modelo sobrestimó los valores de la magnitud del viento en las tres

estaciones y, en forma similar al estadístico anterior, este incrementó con la hora de predicción. En todas las estaciones se obtuvieron altas correlaciones de u , sobre todo en las horas de las 12 a la 30 y cerca de las 36 con DMA, de aproximadamente 3 ms^{-1} como máximo, que resulta ser un sesgo positivo.

Para v la situación es distinta, pues el modelo mostró baja correlación con las estaciones en tierra, excepto a las 36 horas (Chatham), a las 12, 24 horas (negativos) y a la hora 33 (Wafer), mientras que en el barco presentó buenos resultados a las 27 y 42 horas. En ese lapso, los valores de DMA alcanzaron los 3 ms^{-1} con sesgos negativos.

Presión: en general, las estaciones en tierra mostraron altos valores de correlación durante todas las horas de predicción. Se encontró que la DMA fue menor en las tres estaciones en las horas 15 y 27. Asimismo, estos valores fueron más pequeños en la estación del barco, donde el máximo se localizó a las 18 horas con un valor aproximado a los 3,5 hPa, mientras que en las otras estaciones los valores de este estadístico estuvieron entre los 15 y 17,5 hPa para la estación de Chatham, y entre los 10 y los 12,5 hPa en Wafer. El máximo estuvo presente en ambas estaciones a las 21 horas. Para las tres estaciones, el sesgo muestra que el modelo sobrestimó los valores de presión en esta expedición.

Radiación: en las estaciones en tierra se detectó que las mejores correlaciones se dieron en la hora 21, con una diferencia de los datos entre los $100\text{-}150 \text{ Wm}^{-2}$. Un hecho notable fue la subestimación de estos resultados, sobre todo en las horas de mejor predicción.

Tercera expedición, Cuadros 5a, b, c y d

Precipitación: las salidas del modelo presentaron exactamente el mismo comportamiento en ambas estaciones en tierra; sin embargo, en Bahía Wafer

Cuadro 5A. Valores estadísticos calculados entre los datos observados y los simulados por el modelo Expedición III-2009
 Estación: Bahía Chatham
 Simbología: itálica 90-95%, negrita 95-99%, negrita + itálica 99%

	Hora de simulación	6,00	9,00	12,00	15,00	18,00	21,00	24,00	27,00	30,00	33,00	36,00	39,00	42,00	45,00
Humedad relativa	Correlación	0,85	0,39	-0,49	0,76	0,88	0,48	0,51	0,49	0,52	0,56	0,37	0,46	-0,27	0,07
	Desv. med abs.	17,04	12,73	12,87	5,70	4,07	9,81	13,28	10,29	14,90	14,56	12,28	10,82	9,04	8,72
	Sesgo	-17,04	-12,73	-12,87	-3,09	-2,70	-6,69	-13,28	-9,90	-14,90	-14,56	-12,28	-7,86	-2,91	-6,14
Precipitación	Correlación	-0,25	-	-0,19	0,95	0,93	-0,24	0,70	0,74	0,31	-	0,07	0,52	0,00	-0,01
	Desv. med abs.	0,34	3,80	7,89	6,56	15,48	16,39	24,94	30,34	52,53	57,98	57,28	72,35	105,20	114,65
	Sesgo	-0,27	3,80	4,05	5,54	15,38	13,89	24,94	30,34	52,53	57,98	57,28	72,35	105,20	114,65
Presión	Correlación	0,81	0,45	0,17	0,70	0,47	0,40	0,60	0,38	0,14	0,28	-0,31	0,67	0,89	0,84
	Desv. med abs.	16,92	17,80	17,73	16,61	17,01	17,69	17,38	16,27	16,90	17,36	16,83	15,85	16,41	16,99
	Sesgo	16,92	17,80	17,73	16,61	17,01	17,69	17,38	16,27	16,90	17,36	16,83	15,85	16,41	16,99
Temperatura	Correlación	0,79	-0,26	0,21	0,89	0,68	0,25	0,73	0,27	0,75	0,50	0,82	0,28	-0,56	0,05
	Desv. med abs.	3,52	2,82	2,60	0,74	1,13	1,52	2,43	2,30	3,15	2,73	2,68	1,44	2,22	1,59
	Sesgo	3,52	2,82	2,60	-0,16	-0,91	0,06	2,43	2,30	3,15	2,73	2,68	0,71	-0,62	0,41
Radiación	Correlación	-	-	-	0,66	0,56	0,65	-0,51	-	-	-	-	-0,64	-0,43	0,18
	Desv. med abs.	0,00	0,00	7,12	144,63	317,46	216,98	5,09	0,00	0,00	0,00	7,12	283,00	465,40	231,42
	Sesgo	0,00	0,00	-7,12	-61,93	284,73	158,43	-5,09	0,00	0,00	0,00	-7,12	-163,75	-344,07	-11,87
u	Correlación	-0,66	0,56	0,79	-0,21	0,19	0,04	0,34	-0,11	-0,23	0,08	0,64	0,72	0,74	0,62
	Desv. med abs.	1,92	2,81	3,49	1,10	2,65	2,37	1,95	3,42	2,78	3,52	4,21	5,46	4,66	3,29
	Sesgo	-0,78	-2,44	-3,49	-0,57	-2,44	-0,54	-1,00	-2,68	-2,03	-2,12	-2,54	-3,42	-4,66	-3,22
v	Correlación	0,25	0,93	-0,42	-0,11	-0,59	-0,57	-0,04	-0,59	0,11	-0,75	-0,56	-0,11	-0,75	0,04
	Desv. med abs.	2,10	2,66	3,09	3,14	2,82	3,59	4,05	3,88	4,76	4,41	4,07	3,39	2,96	4,10
	Sesgo	-1,70	-2,20	-3,09	-1,65	-1,97	-3,05	-4,05	-3,47	-4,76	-4,41	-4,07	-3,39	-2,52	-4,10
Magnitud del viento	Correlación	0,76	-0,64	-0,23	-0,46	0,53	0,05	-0,11	-0,23	-0,57	-0,45	0,29	0,27	0,51	-0,07
	Desv. med abs.	2,59	3,11	3,70	2,87	3,81	4,37	4,75	5,26	5,46	5,18	4,61	6,49	5,50	5,92
	Sesgo	2,59	3,11	3,70	2,71	3,81	4,37	4,75	5,26	5,46	5,18	4,61	6,49	5,50	5,92

Cuadro 5B. Valores estadísticos calculados entre los datos observados y los simulados por el modelo Expedición III-2009
 Estación: Bahía Wafer
 Simbología: itálica 90-95%, negrita 95-99%, negrita + itálica 99%

	Hora de simulación	6,00	9,00	12,00	15,00	18,00	21,00	24,00	27,00	30,00	33,00	36,00	39,00	42,00	45,00
Humedad relativa	Correlación	0,85	0,57	-0,56	0,42	0,99	0,51	-0,05	0,62	0,52	0,64	-0,53	0,39	-0,07	-0,10
	Desv. med abs.	13,16	<i>10,55</i>	<i>10,17</i>	9,42	6,45	10,00	12,78	9,33	<i>11,02</i>	12,37	12,26	10,99	5,64	8,09
	Sesgo	-13,16	<i>-10,55</i>	-8,26	-4,30	-6,45	-6,87	-0,36	0,67	-7,76	<i>-11,02</i>	-7,66	-6,32	-4,49	-6,27
Precipitación	Correlación	-0,25	-	0,02	1,00	1,00	-0,36	0,67	0,74	0,31	-	0,20	0,49	0,08	-0,10
	Desv. med abs.	0,54	3,80	7,18	6,67	11,38	22,14	31,80	31,10	52,33	57,98	59,00	76,15	109,65	120,39
	Sesgo	-0,47	3,80	5,78	6,67	11,38	15,71	31,80	31,10	52,33	57,98	59,00	76,15	109,65	120,39
Presión	Correlación	0,72	0,22	0,25	0,47	0,96	0,90	0,81	0,63	0,47	-0,10	0,28	0,98	0,88	0,98
	Desv. med abs.	14,31	14,15	16,48	16,13	13,37	13,42	15,32	15,79	14,29	13,71	15,58	15,58	13,19	13,10
	Sesgo	14,31	14,15	16,48	16,13	13,37	13,42	15,32	15,79	14,29	13,71	15,58	15,58	13,19	13,10
Temperatura	Correlación	0,51	0,34	-0,51	-0,93	0,67	0,40	0,00	0,77	0,31	0,78	0,31	0,28	-0,82	-0,15
	Desv. med abs.	2,77	2,28	1,96	1,80	0,86	1,32	2,08	1,69	2,39	2,19	2,03	2,00	1,54	1,56
	Sesgo	2,77	2,28	1,96	1,36	0,57	-0,34	0,32	1,69	2,39	2,19	2,03	1,82	0,25	-0,18
Radiación	Correlación	-	-	-	0,54	0,44	0,60	-0,62	-	-	-	-	-0,73	-0,99	-0,32
	Desv. med abs.	0,00	0,00	4,35	161,00	497,59	195,37	6,05	0,00	0,00	0,00	0,00	132,90	228,31	321,95
	Sesgo	0,00	0,00	-4,35	72,25	491,50	143,64	-6,05	0,00	0,00	0,00	0,00	132,90	80,16	-118,25
u	Correlación	-0,45	-0,12	-0,18	0,23	0,44	0,81	0,54	0,41	-0,26	-0,34	-0,82	-0,91	-0,03	0,74
	Desv. med abs.	1,94	2,76	3,34	1,23	3,06	2,50	2,20	3,52	2,60	3,59	4,24	4,07	3,19	3,02
	Sesgo	-0,54	-2,21	-3,14	-1,16	-3,06	-1,67	-2,20	-2,61	-1,79	-1,89	-2,19	-1,41	-3,19	-3,02
v	Correlación	-0,53	0,16	-0,25	-0,99	0,00	0,32	0,02	0,01	0,50	0,15	-0,20	-0,61	-0,70	-0,60
	Desv. med abs.	2,57	2,91	3,31	3,68	3,55	4,07	3,91	4,05	5,25	4,78	4,30	4,96	3,69	5,00
	Sesgo	-2,20	-2,57	-3,31	-2,31	-3,11	-3,49	-3,91	-3,88	-5,25	-4,78	-4,30	-4,96	-3,51	-5,00
Magnitud del viento	Correlación	-0,18	0,29	-0,13	0,80	-0,94	-0,42	0,37	0,69	-0,48	0,10	0,31	0,11	0,81	-0,12
	Desv. med abs.	2,05	2,99	4,28	2,13	4,70	4,42	4,56	5,36	4,91	5,06	5,18	4,76	4,36	5,40
	Sesgo	2,05	2,99	4,28	2,13	4,70	4,42	4,56	5,36	4,91	5,06	5,18	4,76	4,36	5,40

Cuadro 5C. Valores estadísticos calculados entre los datos observados y los simulados por el modelo Expedición III-2009
 Estación: Barco Arriba
 Simbología: itálica 90-95%, negrita 95-99%, negrita + itálica 99%

	Hora de simulación	6,00	9,00	12,00	15,00	18,00	21,00	24,00	27,00	30,00	33,00	36,00	39,00	42,00	45,00
Humedad relativa	Correlación	0,94	0,38	-0,43	0,16	0,93	0,30	0,39	0,64	0,63	0,76	0,53	0,55	-0,30	-0,45
	Desv. med abs.	2,57	3,78	6,10	11,37	10,43	7,75	6,53	6,60	5,57	4,27	6,91	7,89	9,97	11,19
	Sesgo	-2,57	2,61	3,68	8,99	10,43	5,88	1,08	4,22	-0,46	0,26	4,86	3,47	5,88	4,86
	Correlación	0,88	0,26	-0,21	0,75	-0,75	-0,44	-0,12	0,45	0,37	0,12	0,11	0,03	-0,72	-0,62
Presión	Desv. med abs.	3,49	1,90	2,75	16,91	4,46	5,18	3,73	3,65	3,37	1,39	2,35	17,00	4,48	5,16
	Sesgo	3,49	1,90	2,46	-11,84	-3,39	-0,58	1,06	0,85	3,37	1,39	1,69	-12,61	-4,01	-0,81
	Correlación	1,00	-0,79	0,24	0,87	0,97	-0,03	0,78	0,42	0,72	0,49	0,76	-0,06	0,08	-0,54
	Desv. med abs.	2,32	1,82	1,20	0,75	0,70	1,54	1,16	1,51	2,02	1,82	1,02	2,11	1,23	1,91
Temperatura	Sesgo	2,32	1,38	0,64	-0,55	-0,70	0,07	1,16	0,79	2,02	1,31	0,72	0,45	0,24	0,36
	Correlación	-0,78	0,78	0,75	0,38	-0,25	0,68	0,51	0,72	-0,74	0,11	0,12	-0,74	-0,92	0,94
	Desv. med abs.	5,06	5,90	7,34	3,45	6,62	4,18	4,99	8,21	6,64	5,63	6,56	7,43	7,72	5,69
	Sesgo	-5,06	-5,90	-7,34	-3,45	-6,62	-4,18	-4,99	-8,21	-6,64	-5,63	-6,11	-5,98	-7,72	-5,69
u	Correlación	0,50	0,99	-0,19	0,02	-0,34	0,15	0,32	-0,52	-0,68	-0,59	0,38	0,77	-0,68	0,61
	Desv. med abs.	1,88	2,40	2,41	3,02	2,54	2,63	2,92	3,59	3,79	3,26	1,78	1,61	2,85	3,41
	Sesgo	-1,12	-1,41	-1,59	-0,52	-0,23	-1,99	-2,92	-2,11	-3,79	-3,11	-1,51	-1,61	-1,17	-3,41
	Correlación	0,25	-0,81	-0,74	-0,48	0,11	-0,58	-0,20	-0,85	0,96	0,51	0,54	0,60	0,82	-0,72
Magnitud del viento	Desv. med abs.	0,91	1,39	2,52	2,26	2,43	4,07	4,49	5,06	1,90	2,70	2,43	4,20	3,62	5,14
	Sesgo	-0,91	1,13	2,14	0,80	2,05	3,90	4,49	3,41	1,66	2,70	1,97	4,20	3,62	5,14

Cuadro 5D. Valores estadísticos calculados entre los datos observados y los simulados por el modelo Expedición III-2009

Estación: Barco Abajo

Simbología: itálica 90-95%, negrita 95-99%, negrita + itálica 99%

	6,00	9,00	12,00	15,00	18,00	21,00	24,00	27,00	30,00	33,00	36,00	39,00	42,00	45,00
Hora de simulación														
Correlación	0,85	0,57	-0,56	0,42	0,99	0,51	-0,05	0,62	0,52	0,64	-0,53	0,39	-0,07	-0,10
Desv. med abs.	13,16	10,55	10,17	9,42	6,45	10,00	12,78	9,33	11,02	12,37	12,26	10,99	5,64	8,09
Sesgo	-13,16	-10,55	-8,26	-4,30	-6,45	-6,87	-9,59	-7,76	-11,02	-12,37	-7,66	-6,32	-4,49	-6,27
Correlación	0,46	0,61	0,93	-0,92	0,93	0,61	0,65	0,60	0,69	0,25	0,73	0,78	0,82	0,88
Desv. med abs.	129,73	132,61	133,97	133,58	130,45	122,77	126,08	129,62	129,61	132,09	133,20	132,82	129,83	122,54
Sesgo	129,73	132,61	133,97	133,58	130,45	122,77	126,08	129,62	129,61	132,09	133,20	132,82	129,83	122,54
Correlación	0,93	0,04	0,39	0,62	0,63	-0,05	0,54	0,46	0,44	0,30	0,98	0,50	-0,45	-0,59
Desv. med abs.	2,38	1,74	1,09	1,91	3,34	2,52	1,07	1,46	2,09	2,06	1,09	2,26	3,11	2,88
Sesgo	2,38	1,66	1,01	-1,91	-3,34	-1,53	0,75	0,77	2,09	1,59	1,09	-0,90	-2,40	-1,23
Temperatura														

se encontró una mejor correlación, principalmente a las 6 y a las 18 horas. Para estas horas también se obtuvo una DMA muy baja, menor a los 20 mm, aunque esta crece conforme aumentan las horas de predicción. Este resultado también confirma que la predicción se ajustó mejor en Bahía Wafer. El sesgo corrobora lo dicho anteriormente, pues muestra que el modelo está sobrestimando los valores de precipitación en ambas estaciones.

Temperatura: los resultados muestran horas similares en que las salidas se correlacionan bien, sobre todo a las 15 y a las 18 horas. Las estaciones localizadas en el barco presentaron un comportamiento similar, con una correlación muy cercana a 1 en la hora 6 del modelo. No obstante, en la hora 9 ambas pierden correlación, aunque en el caso de la estación barco arriba es casi nula, mientras que en la estación barco abajo anticorrelaciona fuertemente. La estación en Chatham mostró los valores más altos de la DMA. Los valores más bajos se encontraron en horas cercanas a la 15, ya que en este lapso se encontró el mínimo.

La estación que se emplazó en el barco arriba presentó valores similares a las estaciones anteriores, y las horas 15 y 18 fueron las de menor DMA. Por último, en la estación que estaba en el barco abajo, los mínimos se obtuvieron a las 12, 24 y 36 horas. El sesgo confirma los resultados anteriores, pero muestra que en las horas donde fue menor la diferencia, el modelo subestimó los resultados.

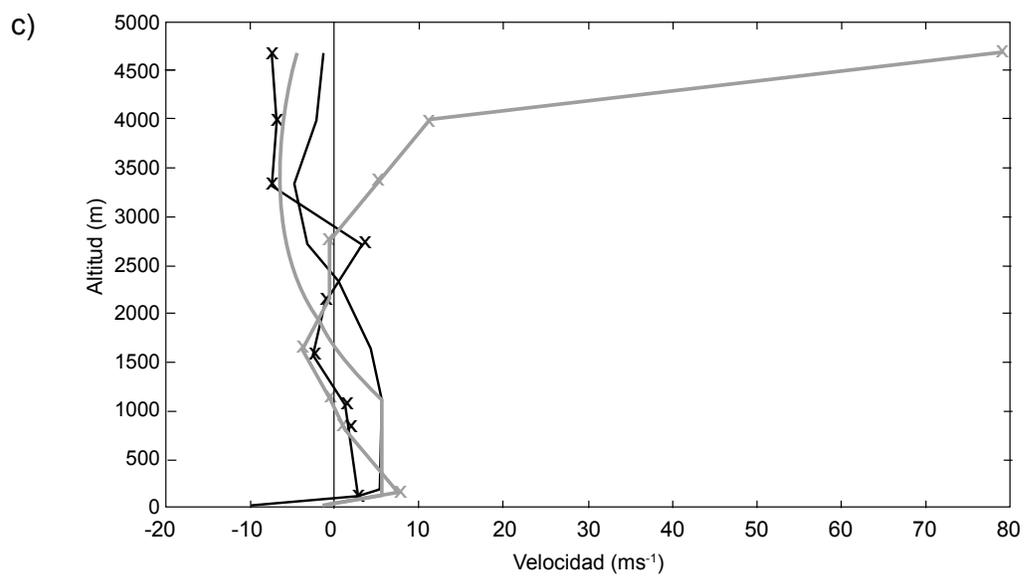
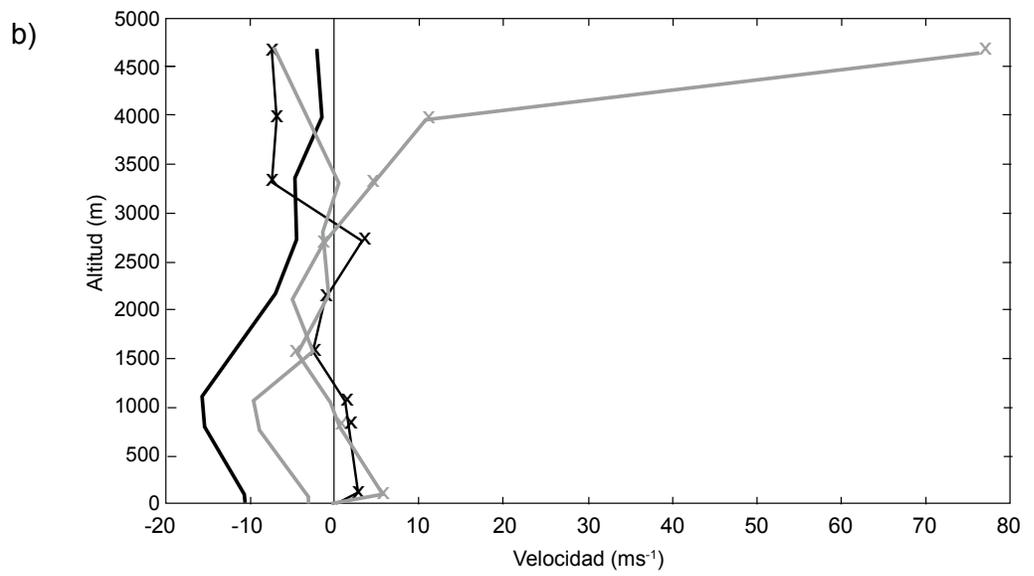
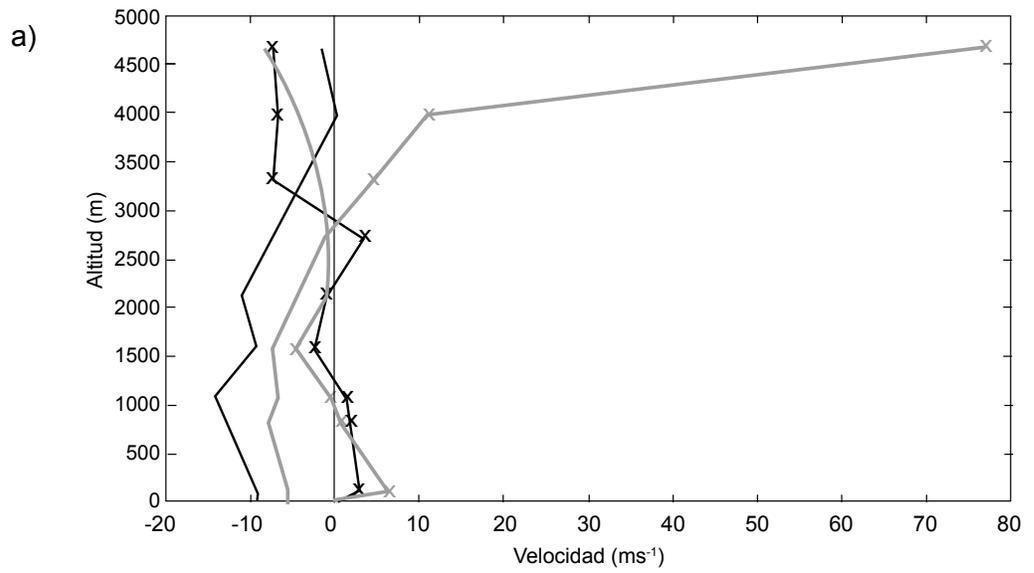
Humedad relativa: para esta variable, las salidas del modelo fueron similares a los datos observados; en general, se obtuvieron altas correlaciones a las horas 6, 15 y 18. Este estadístico fue casi idéntico en las estaciones localizadas en el barco y en las dos localizadas en tierra. El sesgo calculado confirma lo expuesto anteriormente y muestra que el modelo subestimó esta variable en las horas donde

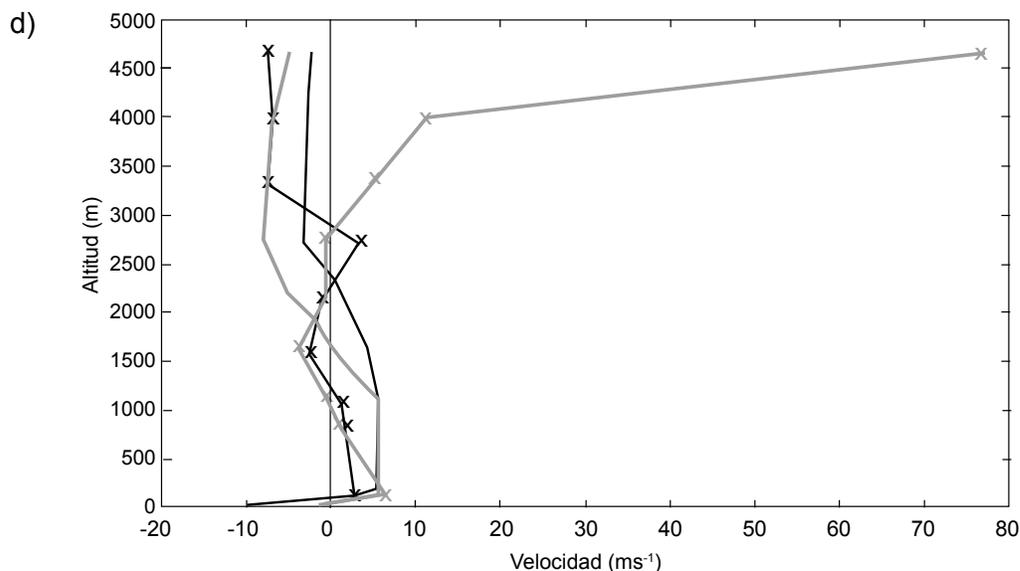
hubo mejor predicción. Sin embargo, en las horas de mejor correlación, la DMA es relativamente alta con valores del orden del 10% en todas las estaciones, aunque la localizada en el barco presentó los valores más bajos. En general, el modelo subestimó los pronósticos de esta variable como se observa en el sesgo.

Presión: La comparación con la estación en el barco registró altas correlaciones en las horas 6, 15, 18 y 42, aunque las dos últimas horas fueron negativas. En la estación de Bahía Chatham se encontraron altas correlaciones en las 6, 15, 39, 42 y 45 horas. Bahía Wafer reportó altos valores a las 6, así como de las 18 a las 24 y de las 39 a las 45. La DMA presentó valores cercanos a los 20 hPa en las horas de mejor correlación, y fue la estación emplazada en el barco la que presentó el menor valor. También se observa que el modelo sobrestimó la presión en todos los pronósticos.

Viento: en Bahía Chatham se presentaron valores altos de correlación en las horas 6 y 9, mientras que Bahía Wafer los presentó a las 15, 18, 27 y 42 horas, y en la estación localizada en el barco se registraron en las horas 9, 12, 27, 30 y 42. En la última estación se dio una de las DMA más bajas a la hora 30, pero en la 42 se registra un valor muy elevado. En la primera estación, la DMA creció con el tiempo de predicción. En la estación Wafer se presentó un resultado similar.

Estas dos estaciones terrestres mostraron tener bajos valores de DMA en las horas 6 y 15. El modelo sobrestimó los pronósticos con valores de hasta 5ms^{-1} . Ambos componentes del viento (u , v) presentaron altas correlaciones en horas similares a la magnitud, con una DMA del mismo orden de magnitud. Sin embargo, se observa que los pronósticos en algunas horas presentaron tanto sesgos positivos como negativos.





Perfiles de viento en altura que muestran la comparación del globo lanzado en la expedición Cimar-Coco I, el 13 de octubre del 2007 a las 13:47 hora local. Hora del modelo a) 18, b) 21, iniciados a las 0 UTC del 13 de octubre; c) 42, d) 45, iniciados a las 0 UTC del 12 de octubre del mismo año.

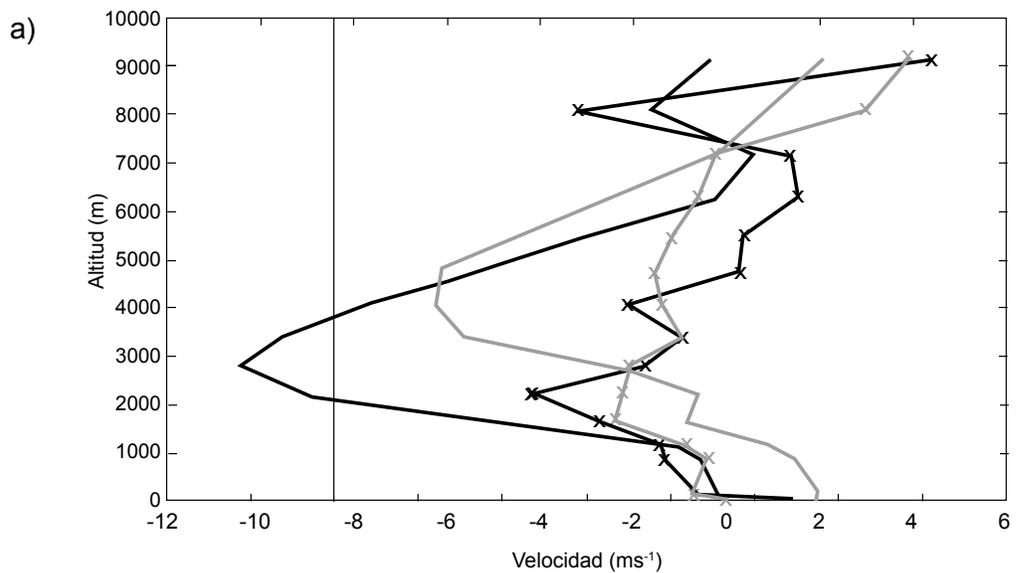
Leyenda: línea negra: modelo; línea gris: modelo; línea negra con marcas: observado; línea gris con marcas: observado.

Cuadro 6A. Sesgo calculado entre los datos obtenidos por teodolitos meteorológicos y los pronósticos del modelo MM5, durante la expedición Cimar-Coco I, en octubre del 2007.

Globo 3		Componente		u		v	
Hora de lanzamiento 13:03:00	Hora Pron./ Nivel	Capa Lim.	Nivel medio	Capa Lim.	Nivel medio	Capa Lim.	Nivel medio
	18	-14,6	-1,44	-8,53	-6,46		
	21	-16,26	-1,01	-8,86	-5,47		
	42	2,67	1,91	3,67	-5,18		
	45	3,19	2,26	3,58	-5,86		
Globo 4		Componente		u		v	
Hora de lanzamiento 13:47:00	Hora Pron./ Nivel	Capa Lim.	Nivel medio	Capa Lim.	Nivel medio	Capa Lim.	Nivel medio
	18	-14,03	-2,21	-8,98	-3,57		
	21	-15,77	-1,87	-9,28	-2,7		
	42	3,45	1,24	3,13	-4,19		
	45	3,77	1,52	3,13	-4,59		

Cuadro 6B. Sesgo calculado entre los datos obtenidos por teodolitos meteorológicos y los pronósticos del modelo MM5, durante la expedición Cimar-Coco II, en abril del 2008.

Globo 1		u		v	
Hora de lanzamiento	Componente				
8:11:00	Hora Pron./ Nivel	Capa Lim.	Nivel medio	Capa Lim.	Nivel medio
	12	1,53	-5,32	0,34	0,13
	15	0,2	-5,31	2,56	-1,58
	18	-0,5	-4,74	5,91	-1,45
	36	-4,55	-3	-0,78	1,03
	39	-3,35	-3,35	-0,25	-0,13
	42	-1,7	-2,51	-0,21	0,29
Globo 2		u		v	
Hora de lanzamiento	Componente				
9:38:00	Hora Pron./ Nivel	Capa Lim.	Nivel medio	Capa Lim.	Nivel medio
	12	1,84	-5,1	-0,09	-0,4
	15	0,52	-5,09	2,15	-2,11
	18	-0,2	-4,52	5,48	-1,98
	36	-4,25	-2,78	-1,21	0,51
	39	-3,06	-3,14	-0,68	-0,65
	42	-1,38	-2,29	-0,63	-0,23



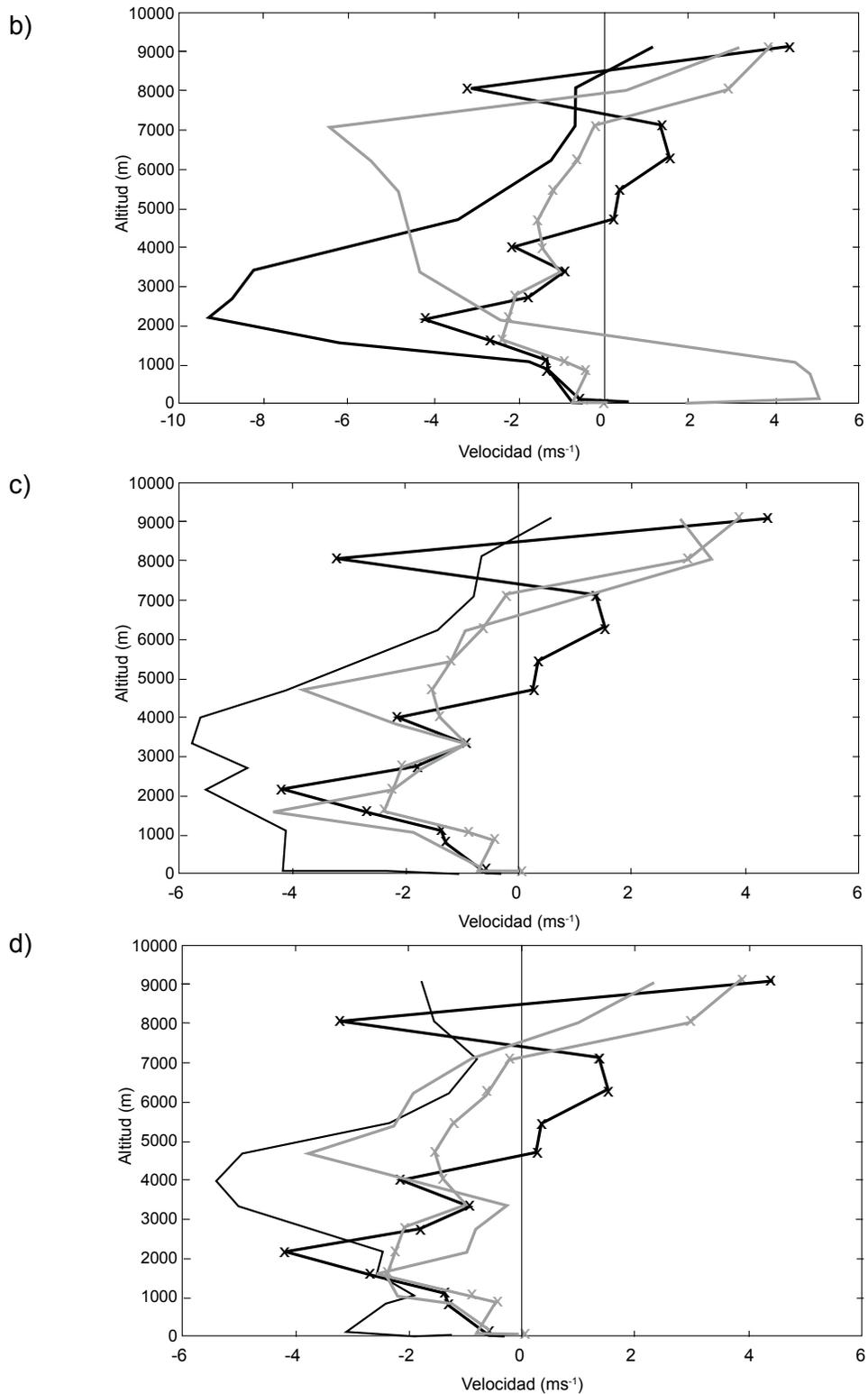


Figura 5. Perfiles de viento en altura que muestran la comparación del globo lanzado en la expedición Cimar-Coco II, el 7 de abril del 2008 a las 13:47 hora local. Hora del modelo a) 15, b) 18, iniciados a las 0 UTC del 7 de abril; c) 39, d) 42 iniciado a las 0 UTC el 6 de abril del mismo año. Leyenda: línea negra: u modelo; línea gris: v modelo; línea negra con marcas: u observado; línea gris con marcas: v observado.

Radiación: las horas 15 y 21 fueron en las que el modelo mostró una mejor correlación mejor con los datos observados. Las diferencias calculadas sobre estas horas presentaron los valores más bajos (150 a 250 Wm^{-2}), al estar las predicciones sobrestimadas con respecto a los valores observados.

Sobre los datos en altura

Debido a que no se tienen series de tiempo bien establecidas, es decir, solo un par de globos pilotos en la primera y segunda expedición, se analizaron los perfiles de viento en altura (figuras 4 y 5) y se calculó el sesgo que presentaban los niveles definidos anteriormente (cuadros 6a y b). En la primera expedición (cuadro 6a) se encontraron mejores resultados de los 1000 a los 4000 m (nivel medio) en todas las horas de predicción, pero muestra un menor sesgo (valor absoluto) a las 18, 21 y 42 horas para u , mientras que en v presentó el menor sesgo a las 18 y 42 horas. Estos resultados también se manifestaron en el segundo globo analizado de esta expedición (figura 4), sobre todo para el caso de u .

El cuadro 6b muestra los resultados de la segunda misión. De aquí se observa que u y v presentaron, en ambos globos analizados, menores sesgos (valor absoluto) en el nivel bajo, comparado al caso anterior. Nótese que estas simulaciones presentaron una mejor representación de v , tanto en el nivel bajo como en el medio. Mientras que u mostró mejoría en capa límite, no así en el nivel medio (figura 5).

Discusión

A pesar de que la configuración de los dominios (figura 1) no permite representar adecuadamente la topografía de la isla, debido a que se utilizó una resolución bastante grosera, las condiciones físicas seleccionadas y el uso de datos como condiciones de frontera del modelo de predicción global GFS han permitido

que el modelo de meso escala MM5 haya hecho una buena simulación de las variables atmosféricas, principalmente dentro del rango de las 9 a las 39 horas de la predicción.

La simulación de precipitación ha mostrado horas en común de buena predicción sobre todo en los meses de octubre y abril. En marzo se obtuvieron las mejores predicciones. Este último hecho indicaría que el modelo representaría mejor esta variable en la temporada húmeda (Alfaro, 2008), aunque se encontró que en general sobrestima esta variable. Tales resultados también se manifiestan en las predicciones de humedad relativa, lo cual confirma la relación que expone dicho autor entre la humedad relativa y precipitación en dicha zona. Sin embargo, con la cantidad de datos *in situ* disponibles no se pudo observar si el modelo reprodujo los patrones convectivos para zonas del Pacífico Tropical descritas por Gray y Jacobson (1977) y Warner y colaboradores (2003).

Los resultados de la comparación de las salidas de temperatura presentan valores que concuerdan con los presentados en el trabajo de Warner y colaboradores (2003), con diferencias de 1-3 °C en las horas de mejor predicción en todas las estaciones colocadas en cada una de las misiones realizadas.

Los valores de presión calculados por el modelo en todos los periodos de las misiones muestran, en general, una desviación del orden de los 10 hPa y alta correlación en horas similares, lo que le da consistencia a la estimación de esta variable.

Por último, los resultados de radiación entrante no concuerdan con los obtenidos por Amador y colaboradores (2006), los cuales obtuvieron un valor aproximado de radiación de onda corta incidente de aproximadamente 190 Wm^{-2} cuyo valor es el típico en las zonas ecuatoriales. De estos resultados se observa que los valores

Los valores de presión calculados por el modelo en todos los periodos de las misiones muestran, en general, una desviación del orden de los 10 hPa y alta correlación en horas similares, lo que le da consistencia a la estimación de esta variable.

se sobrestimaron, ya que excedieron el valor calculado por estos autores.

Tal sobrestimación puede verse reflejada en las predicciones de temperatura, presión y viento. Es probable que el modelo no esté capturando adecuadamente los flujos de energía entre el océano y la atmósfera. Estos autores explican que mucha de la energía que alcanza el océano luego es cedida a la atmósfera suprayacente en forma de calor latente o transportada por corrientes oceánicas.

A pesar de que el modelo ha mostrado simular bien el campo de vientos sobre el Pacífico (Warner y colaboradores 2003), en este caso particular se encontró una mejor simulación en los niveles medios que en la capa límite. A pesar de ello, los resultados en superficie mostraron horas de buena correlación con diferencias en la DMA y el sesgo de un rango entre los 2 y 3ms⁻¹ aproximadamente.

A partir de estos resultados, es claro que se deben hacer más experimentos de este tipo con el fin de encontrar mejores parametrizaciones que logren simular mejor las variables atmosféricas en la Isla del Coco. Asimismo, el hecho de contar con mayor cantidad de datos observados directamente es de vital importancia para futuros trabajos similares.

Agradecimientos

Al proyecto *Conocimiento y gestión de los ambientes marinos y coralinos del Área de Conservación Marina Isla del Coco* (REF: V.I. 808-A7-520), al Fondo Francés para el Medio Ambiente Mundial, a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica, al Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología, y al Centro de Investigaciones Geofísicas por la disponibilidad del equipo, tanto de campo como de laboratorio.

A Jorge Amador, Erick Rivera, Ana María Durán, Marcela Ulate y Blanca Calderón, por la elaboración y uso del sistema de predicción del CIGEFI-UCR. Al Lic. José

Luis Vargas, por su colaboración en la instalación de estaciones automáticas y la toma de datos aerológicos. A los proyectos VI. 808-A9-180, 805-A9-742, 808-B0-654 y 808-B0-092-UCR.

Bibliografía

- Alfaro E. (2008). *Ciclo diario y anual de variables troposféricas y oceánicas en la Isla del Coco, Costa Rica*. Revista de Biología Tropical. 56(2): 19–29.
- Amador J., E. Alfaro, O. Lizano, & Magaña, V.O. (2006, June). *Atmospheric forcing of the Eastern Tropical Pacific: A review*. Progress in Oceanography. 69(2-4): 101–142.
- Amador J. A & Alfaro, E. J. (2009, febrero). *Métodos de reducción de escala: Aplicaciones al tiempo, clima, variabilidad climática y cambio climático*. Revista Iberoamericana de Economía Ecológica, 11: 39-59.
- Ballance L.T., Pitman, R. L. & Fiedler, P. C. (2006, May). *Seabirds, cetaceans and the oceanography of the eastern tropical Pacific: a review*. Progress in Oceanography. 69: 360-390.
- Cortés J. (2008). *Historia de la investigación marina de la Isla del Coco, Costa Rica*. Revista de Biología Tropical, 56(2): 1-18.
- Davis R. (1976, May). *Predictability of Sea surface temperature and sea level pressure anomalies over the North Pacific Ocean*. Journal of Physical Oceanography. 6, 249-266.
- Duhia J. (1989, October). *Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale model*. Journal of Atmospheric Sciences, 46, 3077-3107.
- Duhia J. (1993, May). *A non-hydrostatic of the Penn State/ NCAR Mesoscale Model: Validation test and the simulation of an Atlantic cyclone and cold front*. Monthly Weather Review. 121, 1493-1513.
- Environmental Modeling Center, NCEP Office Note 442, Global Climate and Weather Modeling Branch, EMC, Camp Springs, Maryland, 14pp, noviembre, 2003.
- Fernández-Álamo M.A. & Färber-Lorda, J. (2006, June). *Zooplankton and the oceanography of the Eastern Tropical Pacific: A review*. Progress in Oceanography. 69, 318-359.

- Fiedler P. & Talley, L. (2006, June). *Hydrography of the Eastern Tropical Pacific: A review*. Progress in Oceanography. 69, 143-180.
- Garrison G. (2005). *Peces de la Isla del Coco/ Isla del Coco Fishes*. Heredia, Costa Rica: INBio.
- Gray W. M. & Jacobson Jr., R. W. (1977, September). *Diurnal variation of deep cumulus convection*. Monthly Weather Review. 105: 1171-1188.
- Grell G. A., J. Duhia, and D.R. Stauffer (1994). *A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5)*. NCAR Tech. Note NCAR/TN-398+STR, 138pp, junio,
- Hong, S.Y. & H.L. Pan, *Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model*. Monthly Weather Review. 124: 2322-2339, octubre, 1996.
- Kessler W.S. *The circulation of the eastern tropical Pacific: a review*. Progress in Oceanography. 69: 181-247, mayo, 2006.
- Lizano O. *Dinámica de aguas alrededor de la Isla del Coco, Costa Rica*. Revista de Biología Tropical. 56(2): 31-48, agosto, 2008.
- Mass C.F., D. Ovens, K. Westrick, & B.A. Colle, *Does increasing horizontal resolution produce skillful forecast? The results of two years of real-time numerical weather prediction over the Pacific Northwest*. Bulletin of the American Meteorological Society. 83: 407-433, marzo, 2007.
- Montoya, M. *Conozca la Isla del Coco: una guía para su visitación*. BioCurso Isla del Coco: La isla del tesoro. Organización para Estudios Tropicales, San Pedro Costa Rica, 172p, 2007.
- Morales-Ramírez A. *Caracterización cualitativa del zooplancton del Área de Conservación Marina Isla del Coco (ACMIC), Océano Pacífico de Costa Rica*. Revista de Biología Tropical. 56(2): 159-169, agosto, 2008.
- Pennington J.T., K.L. Mahoney, V.S. Kuwahara, D.D. Kolber, R. Calienes & F.P. Chavez., *Primary productivity in the Eastern Tropical Pacific: A review*. Progress in Oceanography. 69: 285-317, junio, 2006.
- Rivera E.R., & J.A. Amador. *Predicción estacional del clima en Centroamérica mediante la reducción de escala dinámica. Parte II: Aplicación del modelo MM5v3*. Revista de Matemática: Teoría y Aplicaciones. 16(1): 76-104, enero, 2009.
- Sela J. *The NMC Spectral Model*, en NOAA Tech. Rep, NWS-30, 36pp, 1982.
- Sela J. *The new NMC operational spectral model*, en Eighth Conference on Numerical Weather Prediction, February 22-26, Baltimore, Maryland. 1988.
- Tourigny T., & C. Jones. *An analysis of regional climate model performance over the tropical Americas. Part I: simulation seasonal variability of precipitation associated with ENSO forcing*. Tellus. 61A: 323-342, mayo, 2009.
- Tustison B., D. Harris, & E. Foufoula-Georgiou. *Scale issues in verification of precipitation forecast*. Journal of Geophysical Research. 106(D11): 11, 775-11 784, 2001.
- Warner T.T., B.E. Mapes, & M. Xu, *Diurnal patterns of rainfall in Northwestern of South America. Part II: Model simulation*, Monthly Weather Review, 131, 813- 829, mayo, 2003.
- Willett C.S., R. Leben, & M.F. Lavin, *Eddies and mesoscale processes in the Eastern Tropical Pacific: A review*. Progress Oceanography. 69: 218-238, junio, 2006.
- Wilks D.S. (2006). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, 2nd edition, United States of America, Academic Press.