

## Estudios de sensibilidad en la interacción numérica océano-atmósfera

Liset Vázquez-Proveyer <sup>(\*)1</sup>, Maibys Sierra-Lorenzo <sup>(2)</sup>, Roberto Carlos Cruz-Rodríguez <sup>(1)</sup> y  
Arnoldo Bezanilla-Morlot <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, Cuba, [lvazquez@instec.cu](mailto:lvazquez@instec.cu),  
[roberto.cruz@instec.cu](mailto:roberto.cruz@instec.cu)

<sup>(2)</sup> Departamento de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, Cuba, [maibys.lorenzo@insmet.cu](mailto:maibys.lorenzo@insmet.cu),  
[arnoldo.bezanilla@insmet.cu](mailto:arnoldo.bezanilla@insmet.cu)

Recibido: noviembre 2016	Aceptado: enero 2017
--------------------------	----------------------

### Resumen

La interacción océano-atmósfera juega un papel fundamental en la variabilidad climática y del tiempo en Cuba. Con el objetivo de mejorar los resultados de la simulación de esta interacción, en este trabajo se desarrollaron cuatro experimentos con el modelo atmosférico Weather Research and Forecast. Se implementaron dos configuraciones en el modelo, empleando parametrizaciones de cúmulos diferentes en cada caso. Para cada configuración se realizaron corridas actualizando diariamente la temperatura superficial del mar y sin esta actualización. Esta metodología se empleó en la simulación del Huracán Wilma en octubre de 2005. El empleo de una temperatura superficial oceánica dinámica introdujo mejoras en la representación atmosférica y oceánica obtenida a partir del modelo. Los mejores resultados fueron obtenidos empleando la parametrización Grell-Freitas.

**Palabras clave:** Huracán Wilma, océano-atmósfera, parametrización de cúmulos, WRF.

### Sensibility studies in the ocean-atmosphere numerical interaction

#### Abstract

Ocean-atmosphere interaction plays a fundamental role on weather and climate variability in Cuba. In order to improve the simulation results of this interaction, in this work was performed four experiments with the atmospheric model Weather Research and Forecast (WRF). It was implemented two configurations in the model, using different parameterizations of cumulus. For each configuration was run the WRF, first updating daily the sea superficial temperature and then without update. This methodology was used in the simulation of the Hurricane Wilma during October 2005. To use a dynamical sea superficial temperature got better the oceanic and the atmospheric representations obtained in the model. The best results was obtained using the Grell-Freitas parameterization.

**Keywords:** ocean-atmosphere, parameterizations of cumulus, WRF

## 1. Introducción

La interacción océano-atmósfera juega un papel fundamental en el estado del tiempo y la variabilidad climática en Cuba. Es importante considerar esta relación en estudios para la previsión de tormentas, del viento en las costas para su aprovechamiento como recurso energético y el pronóstico de fenómenos atmosféricos como los ciclones. En el marco de desarrollo del proyecto *Sistema de Predicción a muy corto plazo basado en el Acoplamiento de Modelos de Alta Resolución y Asimilación de Datos* (Sierra Lorenzo et al 2014) se pretende implementar un sistema de modelación numérica del tiempo que responda lo más eficientemente posible a las condiciones físico-meteorológicas del territorio cubano y refleje correctamente dicha interacción.

Siendo las parametrizaciones un componente crucial en todo sistema de modelación numérica del tiempo, es necesario en el desarrollo de un sistema eficiente y preciso la realización de estudios de sensibilidad para determinar la configuración más adecuada para modelar correctamente las condiciones deseadas.

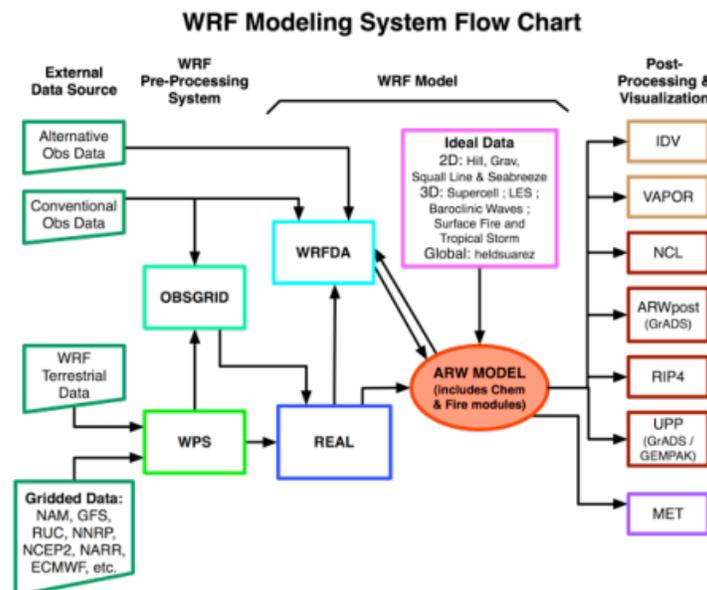
Con el objetivo de mejorar las simulaciones de la interacción océano-atmósfera a partir del sistema de modelación, en este trabajo fueron desarrollados cuatro experimentos con el modelo *Weather Research and Forecast* (WRF) (NCAR 2014). Se implementaron dos configuraciones en el modelo, empleando parametrizaciones de cúmulos diferentes en cada caso. Para cada configuración se realizaron corridas actualizando diariamente la temperatura superficial del mar y sin esta actualización.

## 2. Materiales y Métodos

### 2.1 Modelo WRF

El modelo de pronóstico numérico usado en los experimentos es el WRF (NCAR 2014). Este modelo ha sido desarrollado por la División de Meteorología de Microescala y Mesoescala de la NCAR. En esta investigación se emplea el ARW (Advanced Research WRF) como núcleo dinámico de este sistema de modelación.

El WRF (ARW) actualmente está en su versión 3, disponible desde abril de 2008, actualizado hasta la versión 3.8, la más reciente. En la Figura 1, se muestran los componentes del WRF y cómo se comunican entre sí. Los módulos más importantes son el Sistema de Preprocesamiento (WPS por sus siglas en inglés), el módulo de asimilación de datos WRFDA y el encargado de resolver numéricamente las ecuaciones que modelan la atmósfera, el ARW-solver.



**Fig. 1:** Diagrama de flujo que presenta los módulos del WRF y su comunicación. (Tomado de NCAR 2014).

## 2.2. Diseño de los experimentos

A continuación se describen los experimentos realizados:

Se emplearon dos parametrizaciones de cúmulos: Grell-Freitas y Kain-Fritsch que en lo adelante llamaremos *conf1* y *conf2* (configuración 1 y 2 respectivamente). Para cada configuración las corridas se realizaron primero, con una temperatura superficial del mar (SST por sus siglas en inglés) dinámica, consistente en una actualización diaria tomada de las salidas del Global Forecast System (GFS), que identificaremos como WRF(SST). En un segundo momento se corre el modelo sin dicha actualización de SST, identificándose como WRF.

Las simulaciones desarrolladas se realizaron sobre el dominio de 9 km, en el período del 19 al 25 de octubre de 2005. Se empleó para el post-procesamiento el lenguaje de programación Python (Oliphant 2007 y Millman y Aivazis 2011). Fundamentalmente fueron usadas las librerías Numpy (Van der Walt et al. 2011) para el trabajo numérico, Scipy (Jones et al. 2001) para trabajar con ficheros NetCDF y Matplotlib (Hunter 2007) para la visualización gráfica de los resultados.

Los experimentos realizados parten de una configuración base evaluada en las condiciones físico-meteorológicas de Cuba y diseñada por Sierra Lorenzo et al, 2014:

- Inicialización basada en los datos del GFS con 0,5 grados usando 26 niveles verticales.
- Dominios anidados con resolución de 27 y 9 km (Figura 2).
- Proyección Lambert.
- Centrado en 23N y 80W, cerca del centro de Cuba.
- Paso de integración:  $dt = 150$  segundos.
- Parametrización de microfísica: WSM5.

Este estudio tributa al desarrollo de un sistema de pronóstico a muy corto plazo, por lo que en el proceso de inicialización se emplean datos de pronóstico correspondientes al Global Forecast System (GFS) (National Centers for Environmental Prediction, 2016).

A partir de estos experimentos se realizó un estudio de sensibilidad para parametrizaciones de cúmulos y se analizó el impacto de una SST dinámica como ejemplo de la interacción océano-atmósfera en la modelación numérica a partir del WRF.

## 2.3. Caso de estudio: Huracán Wilma

Uno de los fenómenos más complejos desde el punto de vista de la dinámica atmosférica son los huracanes. Durante su tiempo de vida la interacción océano-atmósfera juega un rol fundamental en los procesos de formación, desarrollo y disipación. Por esta razón el estudio de este tipo de fenómeno atmosférico en la modelación numérica es un muy buen ejemplo de dicha interacción. El huracán Wilma es un caso muy peculiar de ciclón tropical. El proceso de intensificación rápida que experimentó es un evento único en la historia de los ciclones tropicales en el Atlántico. Durante la vida de este huracán la interacción entre el océano y la atmósfera se evidencia en su máxima expresión, razón por la que se toma como caso de estudio en este trabajo. Además la peculiaridad de este sistema permite evaluar mejor la exactitud y precisión en los procesos dinámicos que se modelan a partir del WRF; siempre partiendo de la hipótesis de que la precisión de un modelo no se determina en la simulación de condiciones medias en la atmósfera, si no en qué tan bien pronostica los casos extremos. Según Casati et al. 2008 la necesidad de estimados de confianza en la verificación de un modelo finalmente está siendo abordada en la comunidad científica, estimulada por un mayor interés en la verificación de eventos extremos y raros, en los que los tamaños de las muestras son a menudo demasiado pequeños para permitir un alto grado de confianza en los resultados obtenidos. Ejemplo de esto lo constituyen los estudios realizados por Jaen Cabrera 2013 y Pérez Bello 2011, donde emplean ciclones tropicales como casos de estudio en la evaluación de modelos numéricos.

WPS Domain Configuration



Fig. 2: Dominios anidados.

Wilma fue la depresión tropical número 24 de la temporada ciclónica de 2005 en el Atlántico Norte. Se gestó en la tarde del día 15 de octubre en un área de bajas presiones a unos 120 km al sursuroeste de Montego Bay, Jamaica; zona perturbada posiblemente favorecida por el paso de dos ondas tropicales en esa región durante ese tiempo. Durante el siguiente par de días su movimiento fue lento bajo la influencia de dos zonas de altas presiones en la troposfera media, una cubriendo el Golfo de México y la otra al estenordeste del centro de bajas presiones superficial. Los primeros días se trasladó principalmente hacia el oeste-noroeste.

En la madrugada del día 17 se le otorgó la clasificación de Tormenta Tropical. Las condiciones sinópticas predominantes favorecieron la sucesiva intensificación del sistema, beneficiada por el alto contenido de calor del Caribe, alcanzando la categoría de huracán en la mañana del día 18. Las 24 horas siguientes se caracterizaron por una rápida intensificación del sistema, llegando a ser categoría 5 de la escala Saffir-Simpson (Saffir 1973, Simpson 1974, Schott et al 2012) en la madrugada del día 19, evento sin precedentes para un ciclón tropical en el Atlántico. Durante el transcurso del día presentó oscilaciones trocoidales y ciclos de reemplazo del ojo, perdiendo en intensidad; siendo un huracán categoría 4 en la noche. Su debilitamiento continuó, agudizándose tras penetrar por el extremo nordeste del estado mexicano de Quintana Roo, llegando a ser categoría 2 en la tarde del día 22 de octubre. En la madrugada del día 23 salió al sudeste del Golfo de México, en dirección al nordeste. Su desplazamiento sobre el golfo permitió su intensificación, favorecida por su avance sobre la Corriente del Lazo; y el aumento de su velocidad de traslación por la presencia de una vaguada de capa profunda sobre el este de los Estados Unidos. Su paso al norte de Cuba afectó severamente nuestro territorio con vientos con rachas de hasta 205 km/h e inundaciones que llegaron a clasificarse de fuertes en la región occidental.

El huracán continuó su movimiento rápido hacia el nordeste, penetrando en tierra en la madrugada del día 25 por las inmediaciones de Cape Romano, Florida y saliendo nuevamente al mar en horas de la mañana. Poco tiempo después se reintensificó por última vez para luego extratropicalizarse a las 0000 UTC del día 26. En las 24 horas siguientes fue absorbido por otro ciclón extratropical localizado sobre el oriente de Nueva Escocia. Para más detalles consultar Ballester Pérez y Rubiera Torres 2006 y Pasch et al 2006.

### **2.3.1. Datos para la verificación**

#### **Datos del huracán**

En la presente investigación se emplearon datos correspondientes al huracán Wilma extraídos de la Base de Datos de Huracanes del Atlántico (Atlantic Hurricane Database (HURDAT2)) del Centro Nacional de Huracanes (NHC por sus siglas en inglés) (Landsea et al 2015). Los datos presentes en esta base de datos son el resultado de un análisis post-tormenta realizado por el Centro Nacional de Huracanes para cada ciclón tropical en su área de responsabilidad. El objetivo del análisis es determinar la valoración final de la historia de cada ciclón. EL NHC históricamente ha diseminado esta información en un formato conocido como HURDAT (abreviatura para HURricane DATabase). EL HURDAT2 actualiza la documentación original HURDAT reflejando cambios significativos en el formato y contenido, para ciclones tropicales y subtropicales en la cuenca atlántica.

#### **Datos de acumulados de precipitaciones cada 3 horas**

El TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), es un producto conjunto de la NASA con la Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa (National Aeronautics and Space Administration 2016). Este equipo de trabajo desarrolla herramientas que combinan y analizan la precipitación de fuentes terrestres y espaciales. Para este trabajo se utilizó el producto Análisis de Precipitación Multisatélite con resolución 25 km y acumulados cada 3 horas identificado como 3B42RT; que combina datos de microondas, infrarrojo y de radares (Sierra Lorenzo et al 2014).

#### **Datos de temperatura superficial del mar**

Los datos para la verificación del campo térmico oceánico fueron obtenidos del SST14NA (SST 14 km Norteamérica), producto disponible en la página oficial de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés) (National Oceanic and Atmospheric Administration 2016). Dicho producto muestra las temperaturas superficiales del mar en grados Celsius, derivadas de observaciones satelitales, con una resolución espacial de 14 km. Es generado cada 48 horas para Norteamérica.

#### **Herramienta de evaluación y diagnóstico**

El Método de Evaluación y Diagnóstico Orientado a Objetos Modificado en su primera versión (MODEMod\_v1.0) es una herramienta empleada para la verificación espacial (Roque Carrasco et al 2014) (Rodríguez Genó et al 2016). Inicialmente fue aplicado a los pronósticos de nubosidad, pero puede emplearse en el análisis de otros campos tales como la precipitación y la convección. De forma generalizada este método compara dos campos (pronóstico y verificación), identificando los objetos en ambos y luego calculando propiedades que caracterizan a dichos objetos llamadas atributos. A partir de un algoritmo de lógica difusa se realizan los procesos de fusión de objetos en un mismo campo, y el proceso de asociación en el que se hacen corresponder los objetos similares que se encuentran en campos distintos.

Tributando a la evaluación del rendimiento del modelo se calcula el Índice de Éxito Crítico (CSI) orientado a objetos, que matemáticamente se representa como:

$$CSI = \frac{N_m}{N_m + N_o + N_p}$$

Donde  $N_m$  es el número de pares de objetos seleccionados (aciertos),  $N_o$  es el número de objetos detectados en la observación a los que no se les encuentra una correspondencia en el pronóstico (fallos) y  $N_p$  el número de objetos en el pronóstico a los que no se les encuentra una correspondencia en la observación (falsas alarmas).

Además se calcula la Probabilidad de Detección (POD) que es la proporción de ocurrencia de eventos que se pronosticaron; la Proporción de Falsas Alarmas (FAR), proporción de eventos que se pronosticaron y no ocurrieron y el sesgo BIAS que es la relación entre el número de pronósticos de ocurrencia y el número de ocurrencia reales.

Una descripción más detallada de esta herramienta así como de los parámetros de configuración puede ser encontrada en Roque Carrasco et al 2014 y Rodríguez Genó et al 2016.

### **3. Resultados y discusión**

Empleando los datos de verificación mencionados anteriormente se realizaron comparaciones con los resultados obtenidos a partir de los experimentos realizados con el WRF con el objetivo de determinar la parametrización de cúmulos más adecuada en la simulación del caso de estudio, así como valorar la influencia de una temperatura superficial del mar dinámica en las simulaciones realizadas. Se realizó primeramente un análisis de las condiciones atmosféricas a partir de las simulaciones de trayectoria, intensidad y fuerza del huracán, así como de los acumulados de precipitaciones cada 3 horas en el área correspondiente al sistema tropical. Finalmente se analizó el campo térmico oceánico para diferentes plazos temporales correspondientes al tiempo de vida del huracán.

#### **3.1. Análisis atmosférico**

##### **Trayectoria del huracán**

Para la verificación (best track) se empleó el HURDAT2. Los resultados de comparar las trayectorias para cada experimento con la del HURDAT2 se muestran en la Figura 3.

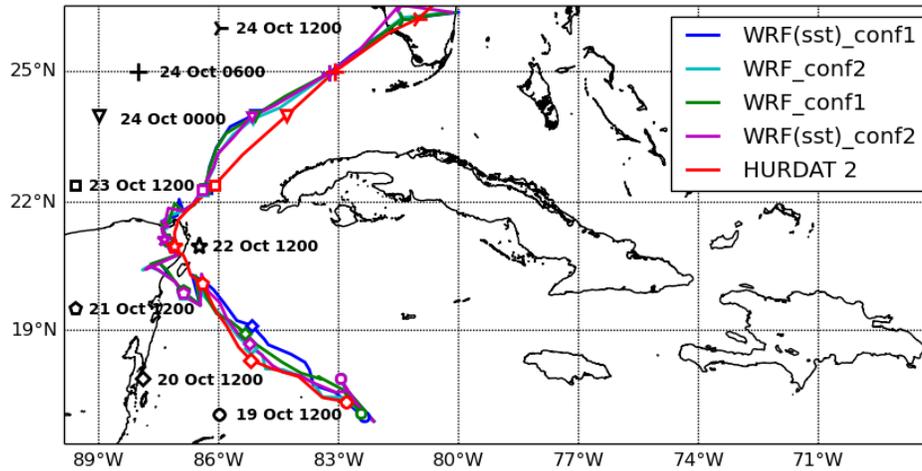


Fig. 3: Trayectorias del huracán para la best track y los 4 experimentos

Como puede observarse, de acuerdo a los datos obtenidos de la HURDAT2, el huracán Wilma mantuvo una componente N-NW hasta que tocó tierra en la Península de Yucatán; manteniendo luego rumbo NE.

En los 4 experimentos las simulaciones de trayectoria muestran cambios bruscos en las zonas aledañas a Yucatán, estas irregularidades conllevan a que de acuerdo al modelo, el huracán toca tierra mucho antes y más al sur en este territorio.

En todas las simulaciones se visualiza la intensificación que experimenta el huracán luego de penetrar en el Golfo de México, así como el aumento de su velocidad de traslación.

La Tabla 1 muestra las distancias (en kilómetros) entre la trayectoria obtenida en cada experimento y la best track para los tiempos estudiados (ver Figura 3). De acuerdo a estos valores el empleo de una SST dinámica introduce una desviación en la simulación en ambas parametrizaciones y es la parametrización de cúmulos Grell-Freitas con la que se obtuvieron mejores resultados.

Tabla 1: Distancia a la best track de cada experimento (en km).

Tiempo dd/hh	<i>conf1</i>		<i>conf2</i>	
	WRF(SST)	WRF	WRF(SST)	WRF
19/12	60.540	50.242	65.172	63.480
20/12	90.945	72.396	42.766	31.678
21/12	55.550	55.054	58.053	58.458
22/12	22.068	21.908	32.774	32.820
23/12	22.577	27.763	34.761	32.707
24/00	80.770	80.248	90.079	86.944
24/06	14.904	14.904	14.904	14.904
24/12	40.477	39.657	57.988	40.819

### Fuerza e intensidad del huracán

En las simulaciones de fuerza e intensidad del huracán se obtuvieron los mayores errores. En la Figura 4 se muestran las comparaciones de los cuatro experimentos con respecto a los datos extraídos de la HURDAT2. Las Tablas 2 y 3, muestran los errores relativos para cada instante de tiempo de cada experimento con respecto a la verificación.

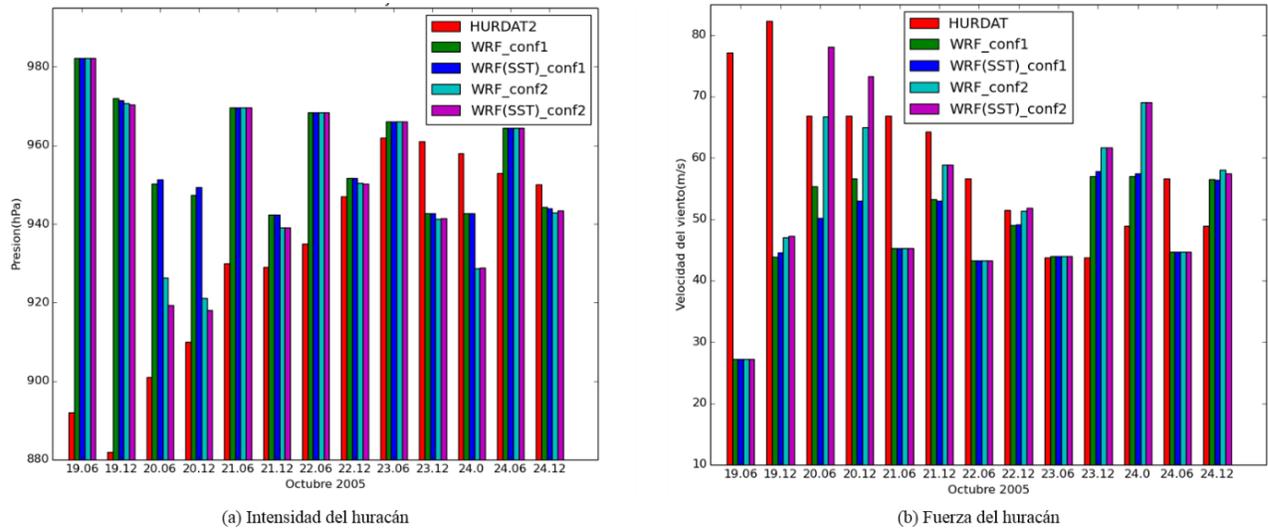


Fig. 4: Comparación entre los 4 experimentos y el HURDAT2.

La diferencia en los comportamientos es considerable, siendo mayor en las simulaciones de fuerza, donde la magnitud de los errores relativos para los instantes de tiempo estudiados es grande (Tabla 3), por lo que las simulaciones de fuerza del huracán concebidas a partir de ambas configuraciones no son consideradas buenas.

Una de las fuentes de error en este estudio radica en los datos con que se inicializó el modelo. La inicialización diaria se realizó en el horario de las 06 UTC con datos de pronóstico del GFS. En este horario, como se observa en la Fig. 4, tanto los valores de intensidad como de fuerza presentan una desviación considerable con respecto a la verificación, por lo que el pronóstico obtenido a partir del GFS para el caso de estudio no es bueno. Al existir esta imprecisión en los datos de inicialización, el proceso de pronóstico del WRF se vio comprometido.

En los primeros plazos temporales los resultados al simular intensidad que se obtienen empleando la parametrización Kain-Fritsch se acercan más a los valores reales obtenidos de la HURDAT2, sin embargo a partir de las 12 UTC del día 23 el error aumenta.

Tabla 2: Error relativo de intensidad con respecto al HURDAT2.

Tiempo dd/hh	conf1		conf2	
	WRF(SST)	WRF	WRF(SST)	WRF
19/12	10.147	10.198	10.025	10.060
20/12	4.316	4.118	0.891	1.232
21/12	1.434	1.435	1.081	1.083
22/12	0.488	0.494	0.341	0.355
23/12	1.894	1.912	2.043	2.047
24/00	1.594	1.599	3.045	3.050
24/06	1.194	1.194	1.194	1.194
24/12	0.629	0.601	0.684	0.744

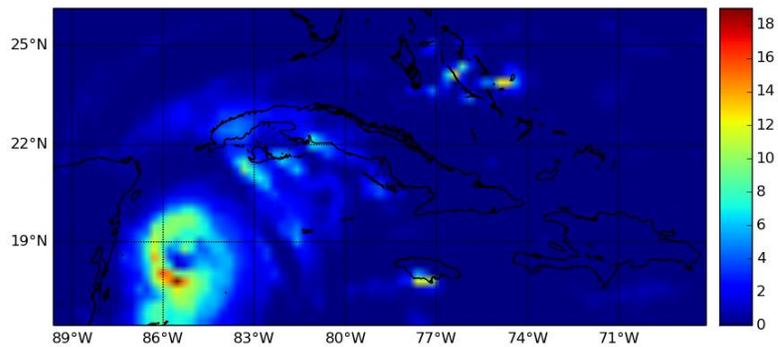
**Tabla 3:** Error relativo de fuerza con respecto al HURDAT2.

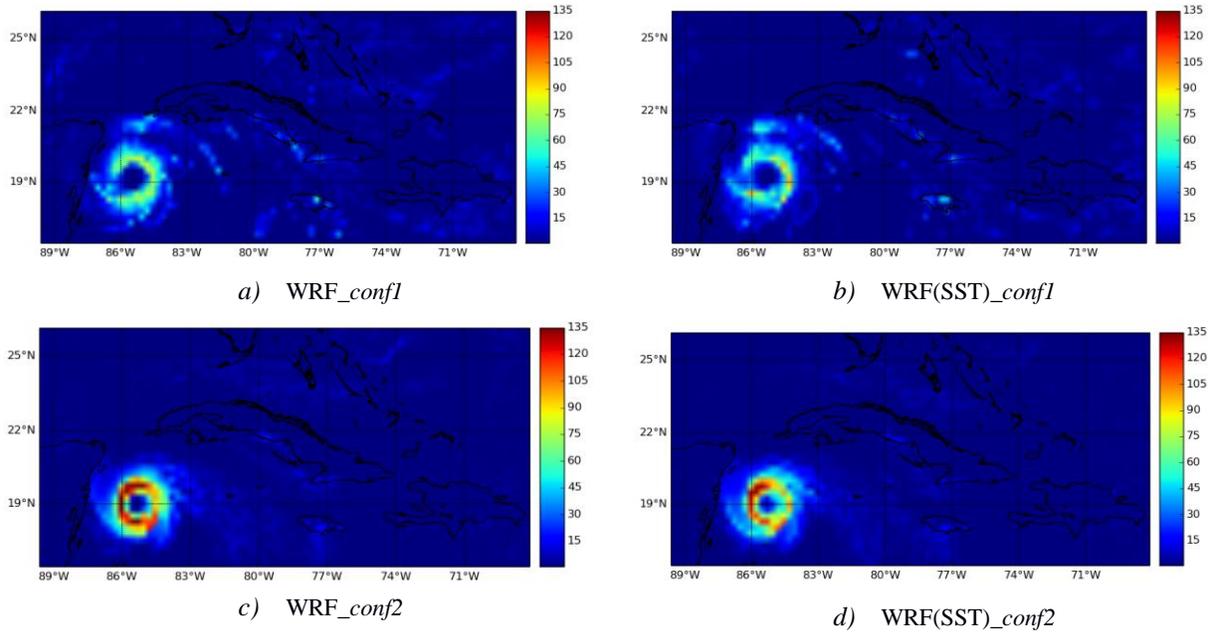
Tiempo dd/hh	<i>conf1</i>		<i>conf2</i>	
	WRF(SST)	WRF	WRF(SST)	WRF
19/12	45.891	46.738	42.579	42.916
20/12	20.807	15.280	9.532	2.929
21/12	17.579	17.260	8.498	8.430
22/12	4.408	4.770	0.882	0.179
23/12	32.145	30.281	41.197	41.179
24/00	17.470	16.570	41.420	41.270
24/06	21.031	21.031	21.031	21.031
24/12	15.481	15.771	17.491	18.688

### Acumulados de precipitación cada 3 horas

Se realizó un análisis de los acumulados de precipitaciones cada 3 horas tomando como plazos horarios de estudio los días 19 (1200 UTC), 20 (1500 UTC), 21 (1500UTC) y 22 (1500 UTC) del correspondiente mes de octubre de 2005. Como verificación se tomaron los datos extraídos del producto 3B42RT del TRMM.

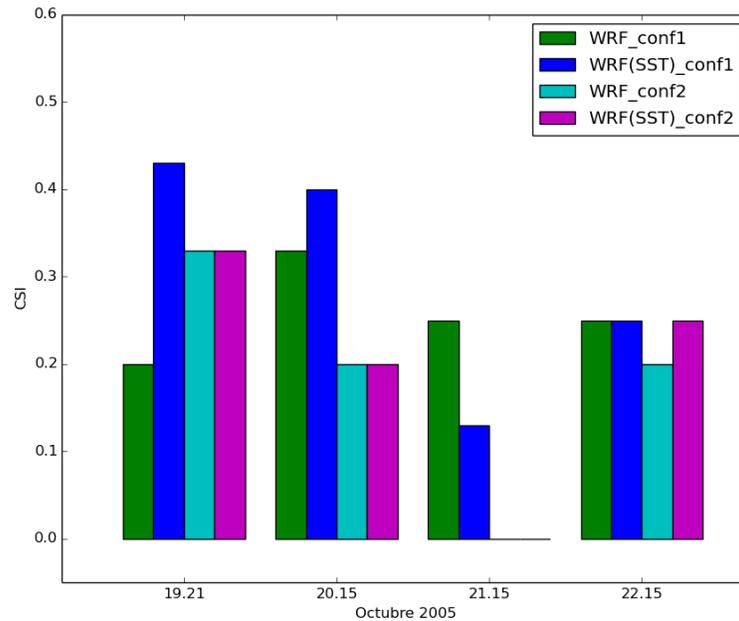
La Figura 5 muestra los acumulados correspondientes al día 20 de octubre a las 1500 UTC de acuerdo a los datos obtenidos del TRMM. Para todos los plazos estudiados existe una sobreestimación apreciable de la variable en cuestión en ambas parametrizaciones, siendo considerablemente mayor en la *conf2* (Figura 6).

**Fig. 5:** Acumulado de precipitación el día 20 de octubre (1500 UTC) con respecto a las 1200 UTC del mismo día.



**Fig. 6.** Acumulados de precipitaciones cada 3 horas obtenidos en cada experimento el 20 de octubre de 2005 a las 1500 UTC.

Los resultados obtenidos para cada uno de los cuatro casos fueron evaluados a partir del empleo de la herramienta MODEMOD\_v1.0. La sobreestimación presente en las simulaciones obtenidas a partir del modelo, fundamentalmente fuera del área correspondiente al huracán, conlleva a una mayor cantidad de objetos identificados en el modelo. Esta es una fuente de error importante al implementarse esta herramienta, por lo que el Índice de Éxito Crítico (CSI) no alcanza valores elevados. Los valores de CSI obtenidos oscilan entre 0.0 y 0.43 (Fig. 7), siendo mayores los correspondientes a la *conf1* en los horarios estudiados. El empleo de una SST dinámica introduce mejoras en las simulaciones de acumulados, así como valores elevados del CSI durante el proceso de verificación a partir del MODEMOD\_v1.0.



**Fig. 7.** Índices de CSI obtenidos para cada configuración estudiada. (En el eje de las abscisas se representa los plazos horarios en el formato día.hora UTC).

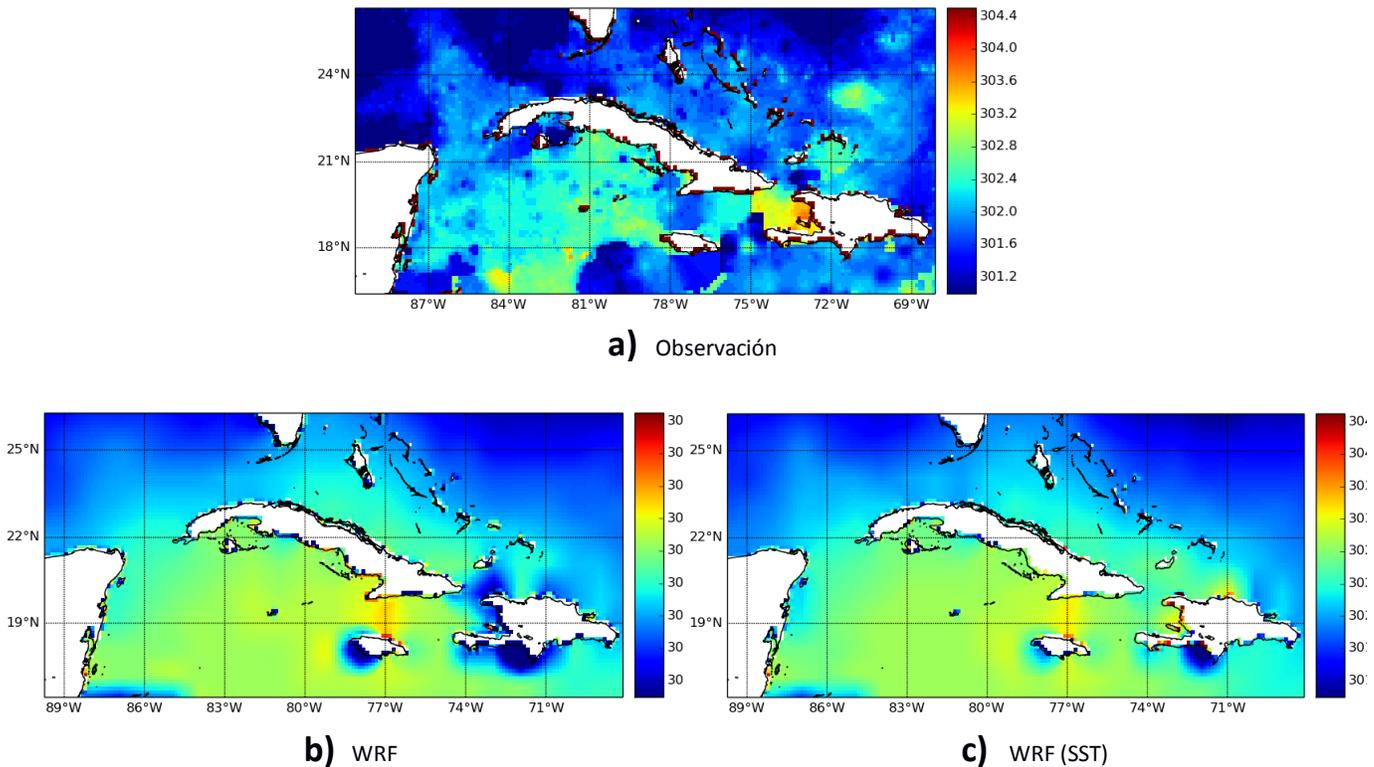
### 3.2. Análisis oceánico

Para la verificación de las simulaciones de SST se emplearon datos obtenidos del producto SST14NA adquirido en el sitio web de la NOAA. Se seleccionó el día 21 de octubre a las 00 UTC para la comparación de las simulaciones realizadas para cada experimento con respecto a la verificación. La parametrización de cúmulos empleada en cada experimento no influye en estas simulaciones.

La Figura 8 muestra las simulaciones de temperatura superficial del mar correspondientes a cada configuración y la verificación.

El empleo de una SST dinámica permite simulaciones más exactas y una representación más suavizada del estado térmico oceánico.

El fenómeno de huella fría, que consiste en el enfriamiento de la superficie marina asociado al paso de sistemas tropicales, únicamente puede simularse empleando en la configuración del modelo una SST dinámica.



**Fig. 8.** Comparación en la simulación de SST (en grados K) empleando la *conf1*.

### Conclusiones

Se desarrollaron cuatro experimentos empleando el modelo WRF para simular el huracán Wilma en un período de estudio comprendido entre el 19 y el 25 de octubre de 2005, y se estudiaron dos parametrizaciones de cúmulos: Grell-Freitas y Kain-Fritsch, así como la influencia de la temperatura superficial del mar en simulaciones atmosféricas. Los resultados arrojaron las siguientes conclusiones:

1. La temperatura superficial del mar provoca ligeras desviaciones en las simulaciones de trayectoria del huracán, así como mejora la representación de los acumulados trihorarios de precipitaciones, fundamentalmente en las zonas correspondientes al sistema tropical, sin embargo sobreestima dicha variable.
2. La simulación del campo térmico oceánico es más exacta empleando una SST dinámica. Para posteriores estudios del fenómeno de la huella fría este aspecto es fundamental, siendo indispensable incluir en el modelo la representación numérica de la interacción océano-atmósfera.
3. Empleando la parametrización Grell-Freitas se obtuvieron los mejores resultados al simular la trayectoria del huracán, así como los acumulados de precipitaciones cada tres horas.

4. El empleo de la parametrización Kain-Fritsch implica mayores desviaciones en las simulaciones atmosféricas para el caso de estudio, caracterizada por una gran sobreestimación de la variable acumulados trihorarios, superior a la de la *conf1*.
5. Al analizar intensidad y fuerza del sistema los errores relativos durante estas simulaciones se consideran elevados (superiores al 10%) y deben realizarse análisis más exhaustivos sobre las fuentes de incertidumbre para mejorar la representación de ambos procesos.

### Recomendaciones

- ❖ Profundizar en estudios de sensibilidad que tributen a mejorar las simulaciones de intensidad y fuerza de sistemas tropicales.
- ❖ Desarrollar un sistema de modelación numérica acoplado océano-atmósfera que al aumentar el nivel de complejidad simule con mayor exactitud la interacción entre ellos.

### Referencias bibliográficas

- Ballester Pérez, M. y Rubiera Torres, J.M. 2006. Temporada ciclónica de 2005 en el Atlántico Norte [En línea]. La Habana. Disponible: <http://www.insmet.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=TEMPORADA&TB2=/Temporadas/temporada2005.htm> [Consultado 20 de marzo de 2016].
- Hunter, J.D. 2007. Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Computing in Science & Engineering*, **9**, 90-95 [En línea]. Disponible: [DOI:10.1109/MCSE.2007.55](https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55) ([publisher link](#)) [Consultado 10 de enero 2016].
- Jaen Cabrera, M. 2013. Simulación de la circulación marina en el Golfo de Batabanó mediante la combinación de los modelos (WRF\_ROMS). Tesis de grado. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas.
- Jones, E., Oliphant, E., Peterson, P., et al. 2001. SciPy: Open Source Scientific Tools for Python [En línea]. Disponible: <http://www.scipy.org/> [Consultado 10 de enero 2016]
- Landsea, C., Franklin, J., Beven, J. 2015. The revised Atlantic hurricane database (HURDAT2) [En línea]. Disponible: <http://www.nhc.noaa.gov/data/hurdat/hurdat2-format-atlantic.pdf> [Consultado 12 de agosto de 2016].
- Mesoscale and Microscale Meteorology Division. 2014. ARW Version 3 Modeling System User's Guide. Complementary to the ARW Tech Note [En línea]. NCAR: Boulder, Colorado, USA. Disponible: [http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3/ARWUsersGuideV3.pdf](http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/ARWUsersGuideV3.pdf) [Consultado 4 de abril de 2016].
- Millman, K.J. y Aivazis, M. 2011. Python for Scientists and Engineers. *Computing in Science & Engineering*, **13**, 9-12 [En línea]. Disponible: [DOI:10.1109/MCSE.2011.36](https://doi.org/10.1109/MCSE.2011.36) ([publisher link](#)) [Consultado 10 de enero 2016].
- National Aeronautics and Space Administration. 2016. Producto TRMM 3B42. [En línea]. Disponible: [http://daac.gsfc.nasa.gov/precipitation/TRMM\\_README/TRMM\\_3B42\\_readme.shtml](http://daac.gsfc.nasa.gov/precipitation/TRMM_README/TRMM_3B42_readme.shtml) [Consultado 20 de marzo de 2016].
- National Centers for Environmental Prediction. 2016. Global Forecast System [En línea]. Disponible: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs> [Consultado 14 de diciembre de 2015].
- National Oceanic and Atmospheric Administration. 2016. Producto SST14NA [En línea]. Disponible: [www.class.ngdc.noaa.gov](http://www.class.ngdc.noaa.gov) [Consultado 20 de marzo de 2016].
- Pasch, R.J., Blake, E.S., Cobb III, H.D. y Roberts, D.P. 2006. Tropical Cyclone Report. Hurricane Wilma. National Hurricane Center.
- Pérez Bello, A. 2011. Pronóstico del oleaje en las costas cubanas y mares interamericanos, mediante el uso de los modelos numéricos MM5, WW3 y SWAN. Tesis de grado. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas.
- Rodríguez Genó, C.F., Sierra Lorenzo, M., Ferrer Hernández, A.L. 2016. Modificación e implementación del método de evaluación espacial MODEMod para su uso operativo en Cuba. *Ciencia de la Tierra y el espacio*, **17**, No.1, 18-31.

- Roque Carrasco, A., Sierra Lorenzo, M., Quintana Rodríguez, N. 2014. Método de Evaluación y Diagnóstico Orientado a Objetos Modificado (MODEMod) utilizando la información de los satélites meteorológicos. *Ciencia de la Tierra y el espacio*, 15, No.2, 139-150.
- Saffir, H.S. 1973. Hurricane wind and storm surge. *The Military Engineer*, 423, 4–5.
- Sierra Lorenzo, M., Ferrer Hernández, A.L., Hernández Valdés, R., González Mayor, Y., Cruz Rodríguez, R.C., Borrajero Montejó, I., Rodríguez Genó, C.F. 2014. Proyecto Sistema de Predicción a muy corto plazo basado en el Acoplamiento de Modelos de Alta Resolución y Asimilación de Datos. Informe de Resultado: Sistema de predicción a mesoescala a cuatro ciclos diarios.
- Schott, T., Landsea, C., Hafele, G., Lorens, J., Taylor, A., Thurm, H., Ward, B., Willis, M., Zaleski, W. 2012. Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale. National Hurricane Center [En línea]. Disponible: <http://www.nhc.noaa.gov/aboutsshws.php> [Consultado 20 de marzo de 2016].
- Simpson, R.H. 1974. The hurricane disaster-potential scale. *Weatherwise*, 27, 169–186.
- Oliphant, T.E. 2007. Python for Scientific Computing. *Computing in Science & Engineering*, 9, 10-20 [En línea]. Disponible: [DOI:10.1109/MCSE.2007.58](https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.58) ([publisher link](#)) [Consultado 10 de enero 2016].
- Van der Walt, S., Colbert, S.C., Varoquaux, G. 2011. The NumPy Array: A Structure for Efficient Numerical Computation. *Computing in Science & Engineering*, 13, 22-30 [En línea]. Disponible: [DOI:10.1109/MCSE.2011.37](https://doi.org/10.1109/MCSE.2011.37) ([publisher link](#)) [Consultado 10 de enero 2016].

#### Acerca de los autores:

**Liset Vázquez-Proveyer:** Estudiante de 5to año de la carrera Licenciatura en Meteorología en el Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC). Las líneas de investigación en que se desarrolla abarcan el pronóstico numérico del tiempo (modelo WRF). Domina los idiomas español e inglés.

**Maibys Sierra-Lorenzo:** Graduada de Licenciatura en Ciencias de la Computación en Universidad de la Habana, 2008. Obtuvo el Máster en Ciencias Matemáticas en Universidad de La Habana, 2011. Se desempeña como Especialista Superior en Meteorología Aplicada en Instituto de Meteorología y como profesora de la carrera de Licenciatura en Meteorología con Categoría Docente Instructor. Las líneas de investigación en que se desarrolla abarcan el Pronóstico Numérico (modelos MM5V3, ARPS y WRF), Wavelets y solución de Ecuaciones Diferenciales en Derivadas Parciales y Tormentas Locales Severas. Domina los idiomas español, inglés y portugués. Se desempeña además como Árbitro de la Revista Cubana de Meteorología.

**Roberto Carlos Cruz-Rodríguez:** Graduado de Licenciatura en Meteorología en el Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC), 2010. Obtuvo el Máster en Ciencias Matemáticas en la Universidad de La Habana, 2016. Se desempeña como profesor de la carrera Licenciatura en Meteorología con Categoría Docente Instructor del Departamento de Física General, Matemática y Computación. Las líneas de investigación en que se desarrolla abarcan el pronóstico numérico del tiempo (modelos MM5V3, ARPS y WRF). Domina los idiomas español, inglés e italiano.

**Arnoldo Bezanilla-Morlot:** Graduado de Licenciatura en Ciencias Físicas en Universidad de la Habana, 1999. Obtuvo el Máster en Ciencias Físicas en la Universidad de La Habana en el año 2001. Trabaja como investigador en el Centro de Física de la Atmósfera en el Instituto de Meteorología y forma parte del grupo de modelación Climática del Caribe. Las principales áreas de investigación son los modelos climáticos regionales PRECIS, RegCM y WRF. Ha sido profesor en varios cursos de modelación climática regional y participa como investigador en proyectos internacionales. Ha sido autor de varias publicaciones en revistas arbitradas internacionales.