

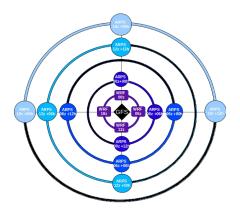
Instituto de Meteorología de Cuba Centro de Física de la Atmósfera

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 automático de predicción a mesoescala de cuatro ciclos diarios



Autores:

Maibys Sierra Lorenzo

Adrián Luis Ferrer Hernández

Roilan Hernández Valdés

Yandy González Mayor

Roberto Carlos Cruz Rodríguez

Israel Borrajero Montejo

Camilo Fernando Rodríguez Genó

Octubre 2014

Resumen

El pronóstico a muy corto plazo es una tarea de vital importancia en el servicio meteorológico de una nación. Esto se debe a que es indispensable conocer el peligro que puede existir a partir de la ocurrencia de algún tipo de severidad asociado a una tormenta convectiva. Con el desarollo de la modelación numérica del tiempo y el incremento de los métodos de observación de la atmósfera; en diversos países se han diseñado e implementado sistemas de predicción a muy corto plazo combinando ambas herramientas. El resultado que se presenta en este trabajo es un primer paso en la construcción de un sistema de tal tipo adaptado a nuestras condiciones meteorológicas y tecnológicas. Para ello se realizaron un grupo de experimentos con el fin de determinar la configuración más apropiada del modelo atmosférico WRF-ARW para el pronóstico a muy corto plazo. La determinación de esta configuración estuvo basada en estudios de sensibilidad de las combinaciones de tres parametrizacines de microfísica y tres de cúmulos para dos dominios anidados de 27 y 9 km de resolución espacial. Para este propósito también se consideró el costo computacional que implica el tiempo de ejecución de cada una de estas combinaciones. También se evaluó la influencia de la inicialización en el pronóstico del modelo WRF, para esto se realizaron 2 tipos de experimentos donde se tomaron como condiciones iniciales; ficheros de análisis y ficheros de pronóstico del modelo GFS. Además se ejecutaron pruebas para los 4 ciclos de corridas del modelo GFS correspondientes a los plazos horarios de las 0000, 0600, 1200 y 1800 UTC. Por otra parte se llevaron a cabo estudios de asimilación de datos de observaciones meteorológicas con la mejor configuración obtenida en los estudios de sensibilidad. Para esto se tomaron datos de estaciones meteorológicas en superficie y sondeos aerológicos. Con esto se pudo determinar la influencia y durabilidad de las observaciones insertadas en el modelo así como su impacto en el pronóstico numérico. La verificación de los resultados se llevó a cabo utilizando los datos de la Red de Estaciones Meteorológicas de Cuba y los datos del satélite TRMM-PR. Se utilizaron métodos de evaluación celda-punto y en el caso de la evaluación espacial se empleó el Fraction Skill Score (fss) y la evaluación orientada a objetos. Para la realización de los experimentos de sensibilidad de las parametrizaciones de microfísica y cúmulos se escogió el año 2008 completo, en el caso de los experimentos de inicialización y asimilación de datos se tomaron 30 días entre febrero y marzo del año 2014. Como resultado final se obtuvo que la configuración más adecuada

para el modelo WRF es la combinación de parametrizaciones de microfísica de WSM5 y la de cúmulos de Grell-Freitas. También se pudo determinar que para fines operativos es factible la combinación de la asimilación de datos de observaciones meteorológicas con la inicialización a partir de datos de pronóstico del modelo GFS.

Índice general

In	trodi	ucción	1
1.	Fun	damentación teórica. Antecedentes	3
	1.1.	Pronóstico a muy corto plazo. Necesidad	3
	1.2.	La predicción numérica en el pronóstico a muy corto plazo. Retos	6
	1.3.	Asimilación de datos	9
	1.4.	Principales sistemas de pronóstico a muy corto plazo e inmediato	11
		1.4.1. Nimrod	11
		1.4.2. RAP/HRRR	12
2.	Mat	teriales y métodos	14
	2.1.	Modelo WRF	14
		2.1.1. Módulo de asimilación WRFDA	16
	2.2.	Diseño de los experimentos	17
		2.2.1. Parametrizaciones de microfísica y cúmulos	20
		2.2.2. Condiciones Iniciales	21
		2.2.3. Asimilación de Datos	22
	2.3.	Evaluación	23
		2.3.1. Verificación celda-punto	24
		2.3.2. Verificación espacial	25

2.4. Datos utilizados y período de estudio	28
2.4.1. Descripción de los períodos de estudio	28
2.4.2. Satélite Meteorológico TRMM-PR	30
3. Discusión de los Resultados	32
3.1. Estudios de sensibilidad. Parametrizaciones de Microfísica y cúmulos	32
3.1.1. Resultados para el dominio 1	33
3.1.2. Resultados para el dominio 2	40
3.2. Sensibilidad a la variación de las condiciones iniciales	42
3.3. Valor agregado de la asimilación de datos	44
Conclusiones	47
Recomendaciones	48
Bibliografía	49
Anexos	54

Introducción

Actualmente, debido al incremento de la densidad poblacional y a la vulnerabilidad de nuestras estructuras socioeconómicas, existe gran interés en el estudio y predicción de los fenómenos meteorológicos que producen tiempo severo. Las tormentas eléctricas, las aeroavalanchas, la caída de granizos y los tornados, son algunos de los ejemplos de severidad que pueden presentarse en una tormenta. En Cuba, estas manifestaciones de severidad, pueden ocurrir en tormentas conocidas como Tormentas Locales Severas (TLS), las cuales fueron definidas por Alfonso en 1994 [7]. Los efectos de estas tormentas cobran mayor importancia cuando se les analiza en conjunto con los fenómenos de tiempo severo que se pueden presentar en éstas, llegando a ser comparables con algunos huracanes [3]. El surgimiento, desarrollo y disipación de una tormenta puede ocurrir en un período de tiempo muy corto y afectar un área muy pequeña, de ahí que prevenir la ocurrencia de esta resulta todo un desafío. Para su detección, seguimiento y pronóstico; es necesaria la disponibilidad de herramientas físico-matemáticas, computacionales y de observación que alcancen alta resolución espacial y temporal.

Muchos de estos procesos pueden ocasionar la pérdida de vidas humanas y materiales. Son responsables, en muchas regiones, de una parte sustancial de las precipitaciones. Además muchas actividades del hombre son vulnerables ante los vientos que se pueden generar en presencia de estas tormentas, por ejemplo los casos de las operaciones aéreas que se realizan en aeropuertos y diversas actividades del turismo. Por estas reazones a nivel mundial, cualquier estudio o programa de investigación encaminado a incrementar los conocimientos sobre estos fenómenos locales y que contribuya a la posibilidad de realizar un pronóstico de los mismos, representa una novedad científica.

Entre las herramientas más utilizadas para el pronóstico de tormentas se encuentran los radares meteorológicos. A partir de una celda de tormenta detectada por el radar se realiza una extrapolación con el objetivo de predecir su movimiento en las siguientes horas(menos de 6 horas). Este tipo de pronóstico se denomina **Nowcasting**. En la actualidad se han incorporado también modelos de pronóstico numérico del tiempo de muy alta resolución para realizar esta predicción.

En Cuba se han realizado numerosos estudios y esfuerzos operativos dirigidos al pronóstico de tormentas

utilizando radares meteorológicos entre ellos el método desarrollado por Novo en 2008 [38]. Recientemente, conducido por el avance de la aplicación de técnicas de modelación numérica, en nuestra institución se encuentra en ejecución un proyecto que tiene como objetivo desarrollar un sistema de predicción a muy corto plazo utilizando el acoplamiento de modelos de pronóstico numérico del tiempo y la asimilación de datos. El trabajo que se presenta es el primer resultado enmarcado en este proyecto, que tributa al pronóstico de fenómenos locales. El primer paso en el largo camino a recorrer es, a partir de un modelo de pronóstico numérico del tiempo, determinar la configuración del mismo más adecuada a nuestras condiciones físico-meteorológicas, para la escala sinóptica y la mesoescala. Los dominios de simulación definidos en estas escalas serán los que alimenten en el siguiente paso, la modelación de alta resolución. El modelo selecciondo para este propósito es el Weather Research and Forecast (WRF) [29] y se definen dos dominios con resolución de 27 y 9 km. Además con la finalidad de obtener una mejor inicialización del modelo, a partir del modelo global GFS (Global Forecast System), se realiza la asimilación de datos de sondeos y estaciones. Finalmente se propone una configuración operativa del modelo que se actualiza cuatro veces al día en los horarios 0000, 0600, 1200 y 1800 UTC. El texto presentado está compuesto por tres capítulos que se describen a continuación:

- * Capítulo 1: Describe la fundamentación teórica y principales antecedes encontrados en el tema. Consta de cuatro epígrafes dirigidos a argumentar: la necesidad del desarrollo de un sistema de predicción a muy corto plazo, el papel de la modelación numérica del tiempo en esta temática y la importancia de la asimilación de datos. Se mencionan además algunos de los sistemas de este tipo más conocidos en el mundo.
- * Capítulo 2: Contiene la descripción del modelo y los módulos del mismo que se utilizan para la simulación. Además se explica el diseño de los experimentos con vista a determinar la mejor configuración teniendo en cuenta: las parametrizaciones de microfísica y cúmulos, la inicialización con análisis o pronóstico y el impacto de la asimilación de datos de sondeos y estaciones en superficie. Se realiza una breve descripción de los períodos de simulación utilizados, los datos de estaciones y de satélite con los que se evalúa y las técnicas de evaluación aplicadas.
- * Capítulo 3: En este último capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos con la ejecución de cada experimento.

Finalmente se plantean las conclusiones a las que se arriba y las recomendaciones.

Capítulo 1

Fundamentación teórica.

Antecedentes

Según el Glosario de Meteorología e Hidrología Inglés-Español (ver. 7, 08/2011) de UCAR/COMET; el pronóstico a muy corto plazo o nowcasting en inglés es el que se realiza normalmente para describir el comportamiento del estado de la atmósfera en un rango temporal de hasta 6 horas o menos. Incluye una descripción del estado actual de la atmósfera y el pronóstico sobre cómo evolucionará en las siguientes horas (menos de 6 horas) siendo muy útil para el pronóstico de procesos de pequeña escala como las tormentas que presentan severidad. Para este tipo de predicción del tiempo en la actualidad se combinan las técnicas de extrapolación, los modelos de pronóstico numérico y la asimilación de datos. En el presente capítulo se realiza una revisión de las definiciones, aspectos y técnicas fundamentales que intervienen en un pronóstico a muy corto plazo exitoso, su implementación operativa; y se describen algunos de los sistemas de tal tipo más conocidos en el mundo.

1.1. Pronóstico a muy corto plazo. Necesidad

El pronóstico del tiempo y el clima en general, comprende la predicción de fenómenos atmosféricos que van desde escalas espaciales y temporales que abarcan todo el globo terrestre y decenas de años, hasta procesos que afectan un área de pocos metros y tienen un tiempo de vida de minutos. En la Figura 1.1 (a), se muestran los tipos de pronósticos clasisficados según la escala espacial y temporal. Agrupando los diferentes fenómenos atmosféricos en estas escalas espaciales y temporales (Figura 1.1, (b)), se puede observar que el pronóstico a muy corto plazo se enfrenta a la predicción de fenómenos de muy pequeña escala y muy corto tiempo de duración. Tal es el caso de los tipos de severidad que se pueden presentar en

las tormentas; por ejemplo la caída de granizo, los tornados y las aeroavalanchas. Se pueden mencionar además las tormentas eléctricas, las lluvias intensas cuyo pronóstico es vital para poder conocer las áreas de acumulación de aguas producto del escurrimiento superficial y así mitigar el impacto de las inundaciones. Todo esto implica que para lograr un buen pronóstico se requiere de herramientas con resolución espacial y temporal muy alta y un alto grado de precisión. Además de los fenómenos antes mencionados, se destacan otras situaciones y actividades en el día a día de un país que demandan un efectivo sistema de predicción a muy corto plazo. Por mencionar solo algunas están: la planificación de la aeronáutica civil, la transportación, la navegación, para las cuales es necesario también la predicción de la visibilidad afectada por la neblina; también en la agricultura y ganadería, los sistemas de monitoreo y alerta temprana, la generación de energía alternativa mediante parques eólicos y fotovoltaicos a partir del viento y la radiación solar respectivamente; el turismo, las actividades públicas, entre otros.

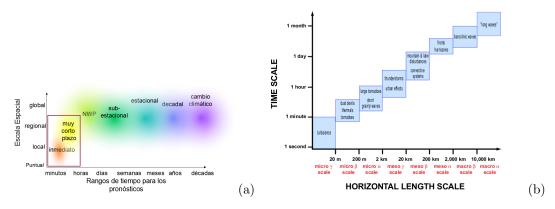


Figura 1.1: (a) Tipos de pronóstico según el rango temporal y espacial que abarcan. (b) Fenómenos agrupados según las escalas espaciales y temporales [51]

En los comienzos, esta actividad en el mundo tanto como en nuestro país, se realizaba apoyada en los diferentes medios de observación, pero con mayor con énfasis en los radares metoerológicos. La técnica que se utilizaba era la extrapolación, en particular la extrapolación de los ecos observados por los radares; con la finalidad de predecir la precipitación en un futuro cercano. Más adelante en la década de 1980, la Oficina de Meteorología del Reino Unido introduce el sistema operacional y Nimrod ([22]) cuya novedad consistía en la combinación de las ya explotadas técnicas de extrapolación de los radares con la modelación numérica del tiempo (MNT). Este sería el camino a transitar hasta los sistemas desarrollados más recientemente como el RUC y RAP/HRRR ([36]), los cuales se describen en detalle en la última sección de este capítulo.

En nuestro país se realizaron numerosos esfuerzos en este sentido también, específicamente en el caso de las tormentas y los fenómenos que se pueden presentar asociados a estas. La mayoría de los estudios han estado enfocados desde la escala sinóptica, tal es el caso de los trabajos de Rivero y Antuña [42], Figueroa (1987) [18], Alfonso ([4], [5], [6], [7]), Lecha et. al.[27], Acosta [1], Bermúdez et. al.[9], y Aguilar [2], [3]. Otros estudios han tomado el enfoque del análisis desde la mesoescala, como son los trabajos de Varela

[48] y González [20], los cuales estudiaron la formación de tornados y la ocurrencia de aeroavalanchas respectivamente; ambos estudios se desarrollaron para la región occidental del país. También De la Nuez en 2010 [16], estudió los ambientes favorables a mesoescala para la ocurrencia de aeroavalanchas en las provincias habaneras. Por otra parte Rabelo [43] elaboró un procedimiento para la estimación de la velocidad de la racha máxima de una aeroavalancha y se suman los trabajos de Camacho [12] y Concepción [13].

Además se han desarrollado líneas de investigación encaminadas a la detección y el seguimiento de tormentas por radar; por ejemplo los estudios de Novo [37], [38]. Este autor desarrolló un método automático de detección y seguimiento de tormentas convectivas por radar. En esta investigación se utilizaron imágenes de reflectividad de radar con 3km de resolución, consecutivas en el tiempo. Para la identificación de tormentas los desarrolladores se basaron en el método de etiquetado de componentes conectados y el seguimiento se realiza buscando la distancia mínima a la próxima posición de la tormenta (ver Figura 1.2). Entre las limitaciones señaladas por el propio autor, vale mencionar que solo es un método bidimensional por lo que no incluye la información tridimensional de la estructura de la tormenta y se basa en un solo umbral de reflectividad para la identificación. Otros estudios han combinado las técnicas de mesoescala con la modelación numérica del tiempo. En esta línea se encuentra Molina [34], trabajo en el que se emplea el modelo WRF para simular la formación de las tormentas. Los trabajos de Pozo [39], [40] y [41] fueron los primeros pasos en la modelación de tormentas convectivas en Cuba, en estos se emplea el modelo ARPS (Advanced Regional Prediction System ([50])). Las experiencias adquiridas en estos estudios permitieron el posterior empleo de este modelo para desarrollar los pronósticos de la formación de nubes en las campañas de lluvia provocada. Otros investigadores implementaron la automatización de los pronósticos del ARPS el cual estuvo funcionando de forma operativa durante 2012-2013.

Todos estos resultados han sido pasos importantes y necesarios que han permitido adquirir fuertes conocimientos teóricos y prácticos de las tormentas que se producen sobre el territorio nacional, así como también han contribuido a desarrollar herramientas para el monitoreo y pronóstico de las mismas.

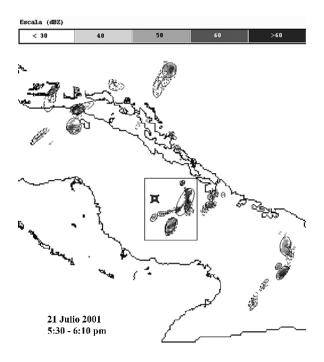


Figura 1.2: Identificación y seguimiento de tormentas a través de radares meteorológicos [38]

1.2. La predicción numérica en el pronóstico a muy corto plazo.Retos

Desde el nacimiento de la modelación numérica del tiempo, entre 1910-1930 (mucho antes de que surgiera le primera computadora), Lewis Fray Richardson, marcó las pautas de lo que es hoy una de las técnicas matemáticas más utilizadas y con mejores resultados en las investigaciones relacionadas con el tiempo y su pronóstico operativo. Con el creciente desarrollo tecnológico y computacional, ha crecido también la comunidad de modeladores (usuarios y desarrolladores) teniendo como resultado modelos de pronóstico numérico del tiempo capaces de simular y predecir procesos atmosféricos de diferentes escalas espaciales y temporales. La Figura 1.3, muestra la estructura de un sistema de modelación numérica del tiempo. En la actualidad los modelos son la guía primaria de los pronosticadores sobre todo para el pronóstico a corto y mediano plazo sin embargo; para el caso que estamos tratando no tienen un buen comportamiento. Veamos brevemente las componentes del sistema de la Figura 1.3 resaltando los detalles que soportan la afirmación anterior.

Los modelos de pronóstico numérico del tiempo (MPNT) se basan en ecuaciones físico-matemáticas que modelan los diferentes procesos atmosféricos. Este conjunto de ecuaciones varía según el modelo pero todas las variaciones parten del sistema de ecuaciones primitivas (1.1 - 1.7) compuesto por: la ecuación de movimiento devenida de la Segunda Ley de Newton; la ecuación de la termodinámica; la ecuación de continuidad; otra ecuación análoga a la anterior pero aplicada al vapor de agua; y la ecuación del gas

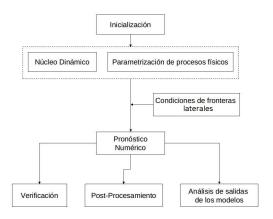


Figura 1.3: Esquema de un sistema de modelación numérica

ideal,

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -u\frac{\partial u}{\partial x} - v\frac{\partial u}{\partial y} - w\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{uv\tan\phi}{a} - \frac{uw}{a} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} - 2\Omega(w\cos\phi - v\sin\phi) + Fr_x$$
 (1.1)

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -u\frac{\partial v}{\partial x} - v\frac{\partial v}{\partial y} - w\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{u^2 \tan \phi}{a} - \frac{uw}{a} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y} - 2\Omega u \sin \phi + Fr_y \tag{1.2}$$

$$\frac{\partial t}{\partial t} = -u \frac{\partial w}{\partial x} - v \frac{\partial w}{\partial y} - w \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{u^2 + v^2}{a} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - 2\Omega u \cos \phi - g + Fr_z$$
(1.3)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -u\frac{\partial T}{\partial x} - v\frac{\partial T}{\partial y} + (\gamma - \gamma_d)w + \frac{1}{c_p}\frac{dH}{dt}$$
 (1.4)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -u \frac{\partial \rho}{\partial x} - v \frac{\partial \rho}{\partial y} - w \frac{\partial \rho}{\partial z} - \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right) \tag{1.5}$$

$$\frac{\partial q_v}{\partial t} = -u \frac{\partial q_v}{\partial x} - v \frac{\partial q_v}{\partial y} - w \frac{\partial q_v}{\partial z} + Q_v \tag{1.6}$$

$$P = \rho RT \tag{1.7}$$

donde u, v y w son las componentes cartesianas de la velocidad, p la presión, ρ la densidad, T la temperatura, q_v la humedad específica, Ω la frecuencia rotacional de la Tierra, ϕ la latitud, a el radio de la Tierra, c_p es el calor específico del aire a presión constante, g es la aceleración de la gravedad, H representa la pérdida o ganancia de calor, Q_v la pérdida o ganancia de vapor de agua producto de los cambios de fase y Fr es el término de fricción en cada coordenada [49].

Las ecuaciones anteriores, se aplican a procesos de todas las escalas incluyendo procesos como la turbulencia, la convección local, entre otras, que son de muy pequeña escala. En la práctica sin embargo, no es posible resolver explícitamente estos procesos, por lo que se separa en dos componentes: la componente de las escalas que los modelos pueden resolver y la componente correspondiente a los procesos físicos de subescala que son parametrizados. La primera componente corresponde al Núcleo Dinámico de un sistema de modelación numérica del tiempo y la segunda a las Parametrizaciones del mismo. Las parametrizaciones resuelven estadísticamente o a través de algoritmos los efectos vinculados a la relación de los procesos físicos no representados por los modelos con las variables que sí calcula. Las causas por las que normalmente se parametriza una proceso físico son: es de muy pequeña escala y no es resuelto por el modelos, es muy complejo y por tanto computacionalmente costoso de resolver o no existe suficiente conocimiento para representar explícitamente el mismo a través de ecuaciones matemáticas. La interacción de las parametrizaciones con el Núcleo Dinámico es lo que define la precisión del modelo y tiene un peso significativo en el tiempo de ejecución. Entre los procesos que se parametrizan se encuentran: la radiación solar, la microfísica de las nubes y los cúmulos.

Las ecuaciones que competen al Núcleo Dinámico, no tienen solución analítica por lo que se requieren métodos numéricos para encontrar una solución aproximada. Entre los esquemas numéricos más utilizados se encuentran: las Diferencias Finitas, los Elementos Finitos y los métodos espectrales. Asimismo como estamos tratando con ecuaciones diferenciales en derivadas parciales estamos ante un problema de condiciones de fronteras y valores iniciales. Las condiciones de frontera incluyen las laterales, las del tope y las de superficie. Los modelos globales por ejemplo, no tienen límites laterales, el dominio computacional se considera periódico. Por otro lado a los modelos de área limitada se les aplican bordes forzados externamente, es decir, la frontera se interpola a partir de una malla perteneciente a otro modelo. La condición de frontera en el tope es artificial y se topa en la tropósfera. La combinación de cualquiera de estas variantes de solución numérica y condiciones de frontera, puede conducir a efectos no físicos que todos los usuarios de los modelos deben conocer, pero no son los que afectan la precisión de los modelos en el pronóstico numérico a muy corto plazo. Relacionado con esto, está el proceso de inicialización.

Para comenzar la integración de las ecuaciones, debe determinarse el estado inicial de cada una de las variables. La calidad del pronóstico dependerá en gran medida de las condiciones iniciales. Si en el proceso de inicialización los campos de masa y momentum no están balanceados surgen las ondas de gravedas inerciales producto de que el modelo trata de ajustar sus campos. Éstas pueden interferir en la representación adecuada de características reales. Además si la inicialización no contiene suficiente información sobre los movimientos verticales asociados a la orografía, la convección, entre otros; el modelo tiene que crear estas características durante el pronóstico y ello involucra hasta las primeras 24 horas de la salida numérica. Por este motivo los modeladores no utilizan la predicción numérica de las primeras 12 a 24 horas después de la inicialización, pues los modelos requieren autoajustarse en ese tiempo. He aquí el problema que enfrentamos en la aplicación de la MNT al pronóstico a muy corto plazo. Con el objetivo de disminuir el tiempo de autoajuste se pueden adoptar varias estrategias que explicamos a continuación.

El proceso de inicialización de un MPNT, puede ser estático o dinámico. En el enfoque estático, la información obtenida de los diferentes medios de observación de la atmósfera es interpolada a los puntos de la malla del modelo mediante un análisis objetivo, se le aplican las restricciones físicas y con esta malla

inicial, el modelo comienza la integración. Esta variante requiere el tiempo de autoajuste ya mencionado y se conoce también como **cold start**.

El enfoque dinámico propone la aplicación de restricciones de forma dinámica durante la corrida del modelo, que ajusten el mismo. La primera estrategia de este tipo, es inciar el modelo 12 o 24 horas antes de la hora de inicialización deseada, y correr el modelo para que se autoajuste en este período de pre-pronóstico. Otra variante sería asimilar datos durante este período. El problema con esta propuesta es que se requiere mayor capacidad de cómputo. Una técnica muy utilizada, es partir del pronóstico de un modelo ya ajustado en el plazo inicial como primera aproximación del análisis objetivo. En este caso las observaciones se aplicarían para ajustar el pronóstico del modelo válido en la hora inicial. Esta técnica se denomina asimilación de datos sequencial o intermitente. Por último, está el enfoque que asimila datos de forma continua según estén disponibles, el cual es ideal si contamos con la comunicación y los recursos computacionales suficientes, que no es nuestro caso.

Según lo explicado hasta este punto, el reto en lograr una aplicación factible y eficiente de los modelos de pronóstico numérico del tiempo en la predicción a muy corto plazo, está en estabelcer un sistema de asimilación de datos adecuado según las posibilidades tecnológicas con las que se cuenta.

1.3. Asimilación de datos

La asimilación de datos es un método de análisis en el cual la información de las observaciones se acumula durante un período de tiempo para luego convertirla en un estado del modelo. Una vez insertada la información en el modelo este aplica restricciones de consistencia dinámica entre todas las variables meteorológicas y produce un campo de análisis. Las principales componentes de en el proceso de asimilación de datos son: las observaciones, el campo de fondo o first guest que se obtiene de un análisis previo o de un pronóstico de un modelo y las restricciones dinámicas que pueden estar basadas en un modelo. Se han desarrollado múltiples métodos cuya finalidad es la inserción de datos meteorológicos en la MNT. Detrás de los mismos se encuentran métodos matemáticos muy complejos cuya rigurosa explicación no es objetivo del trabajo por lo que se describen brevemente a continuación:

- Correcciones Sucesivas: es uno de los primeros métodos desarrollados para la interpolación de datos de observaciones. En este caso el campo de fondo es considerado la mejor aproximación de las variables en la malla y es sometido a ajustes sucesivos a partir de las observaciones que se encuentran en un radio determinado alrededor de cada celda.
- Interpolación Estadística o Interpolación Óptima: A diferencia del esquema anterior, los análisis se crean teniendo en cuenta el error estadístico.

- Análisis Variacional Tridimensional (3DVAR): Se basa en la minimización de una función que pondera las diferencias entre las observaciones y el campo de fondo. Tiene en cuenta también los errores estadísticos.
- Análisis Variacional de Cuatro Dimensiones (4DVAR): Es una generalización del anterior que en vez de realizar la asimilación de datos en el tiempo cercano al tiempo inicial del modelo, lo realiza en un intervalo de tiempo.
- Filtro de Kalman: Basado en el método Least-Square.
- Métodos Híbridos: Se utiliza mucho la combinación del filtro de Kalman con su variante más avanzada, el Ensemble Kalman Filter (EnKF) con el método 3DVAR.

Para mayor información el lector puede consultar los textos [26], [49].

Entre los softwares de asimilación de datos más populares se encuentran el ADAS (ARPS Data Asimilation System) que utiliza un método iterativo que converge al mismo resultado al que se llega si se empleara la Interpolación Óptima. El ARPS además trae implementadas las variantes 3DVAR y EnKF. Por tro lado se encuentra el WRFDA (Data Asimilation Weather Research and Forecast), el módulo de asimilación del modelo de pronóstico numérico del tiempo WRF.

En Cuba se han desarrollado varios estudios para verificar los pronósticos numéricos con técnicas de asimilación de datos de observaciones meteorológicas. Cruz (2010) [14] empleó el módulo Little_R del modelo MM5V5 (Fith Generation Mesoescale Model Version 3) para asimilar datos de las estaciones meteorológicas cubanas. Posteriormente Hernández (2013) [24] utilizó el módulo ADAS del modelo ARPS para asimilar las estaciones cubanas y el radar doppler de Cayo Hueso, Florida. Con estos estudios se pudo comprobar que el empleo de las técnicas de asimilación de datos contribuye notablemente a mejorar la calidad del pronóstico numérico, y además se pudo determinar cómo influye la asimilación de cada tipo de observación en la evolución en el tiempo del pronóstico numérico. Combinando las técnicas de asmilación de datos y el estudio de fenómenos de mesoescala, Ferrer (2013) [19] desarrolló un estudio de la formación de tornados en Cuba. En este trabajo se pudo comprobar algunos de los mecanismos planteados por otros autores y además se encontraron algunas otras particularidades que intervienen en la tornadogénesis de los tipos de tornados mas frecuentes en nuestro país. Además este trabajo constituyó un importante paso de avance en la aplicación práctica de la utilización de la modelación numérica del tiempo y la asimilación de datos como una herramienta importante en la predicción de fenómenos a mesoescala en nuestro país.

1.4. Principales sistemas de pronóstico a muy corto plazo e inmediato

Varios son los sistemas que combinan la asimilación de datos con la modelación numérica del tiempo orientada al pronóstico a muy corto plazo. La India y China tienen algunos de los sistemas de este tipo más conocidos ([46], [28]). En esta sección describimos dos de los más conocidos, el Nimrod del Reino Unido y el RAP/HRRR de Estados Unidos.

1.4.1. Nimrod

El sistema Nimrod [22], fue desarrollado en la Oficina Meteorológica del Reino Unido (UK Met Office). Tiene como objetivo el pronóstico de todas las variables meteorológicas en un plazo de hasta 6 horas. Entre los pronósticos de mayor calidad que ofrecen está el pronóstico de lluvia y el de visibilidad. El área cubierta por este sistema incluye al Reino Unido, mares adyacentes y parte del continente cercano(ver Figura 1.4). Los productos se elaboran con una resolución de 5 km y la componente físico-dináminca se basa en un Modelo de Mesoescala que es una versión del Modelo Unificado de la Oficina Meteorológica.

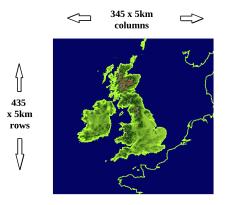


Figura 1.4: Dominio de pronóstico del sistema Nimrod [22]

La habilidad del Nimrod para pronosticar la lluvia es lo más destacado del sistema. La elaboración de este producto consta de 5 etpadas dadas por:

- 1. Procesamiento de los datos de satélite,
- 2. Procesamiento de los datos de radares,
- 3. Blending del dato de lluvia
- 4. Asimilación y pronóstico numérico del tiempo
- 5. Pronóstico final mesclando lo obtenido en las etpas anteriores.

La asimilación de datos se realiza cada 15 minutos generando análisis que alimentan el Modelo de Mesoescala. El tipo de asimilación es 2DVAR ya que solo considera los campos horizontales. Los pronósticos se elaboran cada 30 minutos.

Otras versiones de este sistema han sido desarrolladas para abarcar una región grande, tal es el caso del Nimrod Europeo. En la Figura 1.5 se observa el dominio de esta versión ofreciendo un pronóstico de acumulado de precipitación.

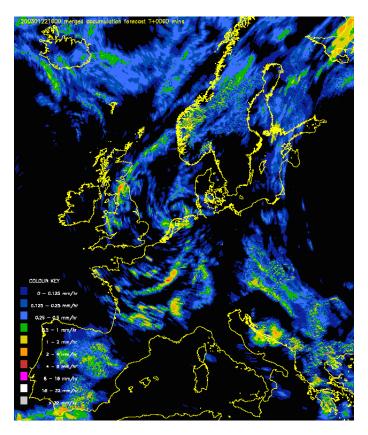


Figura 1.5: Pronóstico de lluvia realizado por la versión europea del Nimrod [22]

1.4.2. RAP/HRRR

Otro sistema com muy buen comportamiento y que en su dominio de simulación incluye nuestra área es el RAP (Rapid Refresh)/HRRR (High-Resolution Rapid Refresh) System [36]. En la Figura 1.6 se observa que cuenta con un dominio de mesoescala con resolución de 13 km y uno de alta resolución con 3 km.

El modelo de pronóstico numérico del tiempo que utiliza, es el WRF-ARW (Advanced Weather Research and Forecast), con parametrización de cúmulo Grell-3, microfísica de Thompson y esquema de capa fronteriza MYNN. Además utiliza un análisis híbrido de interpolación estadístico basado en un ensemble global de 80 miembros. La salida de 13 km de resolución cuenta con 50 niveles verticales y 24 ciclos diarios, es decir, se actualiza cada una hora. El ciclo de actualización horario se basa en el método 3DVAR. Los

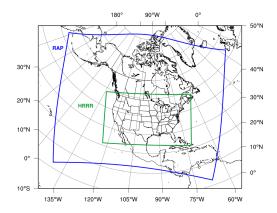


Figura 1.6: Dominios de simulación del RAP/HRRR [36]

datos que se insertan en la modelación a partir de la asimilación son los radio-sondeos, los radares, las estaciones en superficie METAR, boyas, los datos del satélite GOES, el agua precipitable a partir del GPS, entre otros. Además incorpora un sistema de evaluación operativo. En la Figura 1.7 se muestra un pronóstico de precipitación, la observación y la evaluación.

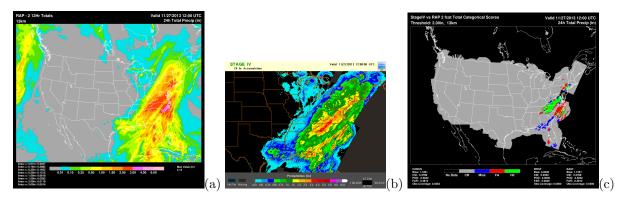


Figura 1.7: Ejemplo de un pronóstico de precipitación (a), la observación (b) y el resultado de la evaluación (c) [36]

Capítulo 2

Materiales y métodos

Como se mencionó en el capítulo anterior, el modelo WRF es muy utilizado para el pronóstico del tiempo y es la componente dinámica de varios de los sistemas de predicción numérica. En el sistema que se propone desarrollar será también la base dinámica. Para determinar la configuración del modelo WRF que con mejor precisión se ajusta a las condiciones físico-meteorológicas de Cuba, se realizaron una serie de estudios de sensibilidad basados en variaciones de las parametrizaciones de microfísica y cúmulos, condiciones iniciales con datos de análisis y de pronóstico del modelo GFS, y por último, condiciones iniciales más la asimilación de datos de sondeos y estaciones con el módulo de asimilación WRFDA. La evaluación de los experimentos anteriores se realiza puntualmente mediante los estadígrafos que se utilizan tradicionalmente y además se realiza un verificación espacial con el índice Fraction Skill Score y con el MODE([15]). Los datos utilizados durante la ejecución de esta investigación fueron las mediciones de las estaciones en superficie para el año 2008 completo y los días entre el 18 de febrero y hasta el 19 de marzo de 2014. Además se utilizaron los datos del TRMM-PR para la evaluación espacial de la precipitación. Aunque el objetivo del trabajo es implementar un sistema de predicción numérica a mesoescala con cuatro actualizacines diarias a las 0000, 0600, 1200 y 1800 UTC, solo se realizaron corridas con los cuatro horarios en los experimentos referidos a la sensibilidad del modelo en la inicialización con datos de análisis y pronóstico del GFS. El resto de los estudios se limitaron al plazo de las 0000 UTC debido a los recursos computacionales que demandan.

2.1. Modelo WRF

El modelo de pronóstico numérico WRF ha sido desarrollado por la división de Meteorología de Microescala y Mesoescala de la NCAR([29]). Este sistema de modelación tiene dos núcleos dinámicos,

el NNM y el ARW(Advanced Research WRF). Este último será el utilizado en esta investigación. El WRF(ARW) actualmente está en su versión 3, disponible desde abril de 2008 y que ha sufrido actualizaciones hasta la versión 3.6.1, la más reciente. Según sus desarrolladores, es posible su aplicación en un amplio espectro de escalas espaciales que van desde metros a miles de kilómetros. En la Figura 2.1, se muestran las componentes del WRF y cómo se comunican entre si. Los módulos más importantes son el Sistema de Preprocesamiento o Preprocessing System(WPS), el módulo de asimilación de datos WRFDA y el módulo que resuelve numéricamente las ecuaciones que modelan la atmósfera, el ARW-solver.

WRF Modeling System Flow Chart Post-External WRF Model Processing 8 System Visualization Alternative Ideal Data Obs Data Squall Line & Seabreeze 3D: Supercell ; LES ; VAPOR Baroclinic Waves Surface Fire and Tropical Storm Conventional Obs Data WRFDA Global: heldsuarez NCL OBSGRID ARWpost (GrADS) ARW MODEL Terrestrial RIP4 UPF WPS REAL Gridded Data: NAM, GFS MET RUC, NNRP NCEP2, NARR ECMWF, etc

Figura 2.1: Diagrama de flujo que presenta los módulos del WRF y su comunicación [29]

El WPS tiene como objetivo la definición de los dominios de simulación, la interpolación de los datos orográficos y de uso de suelo, a los dominios definidos; y la interpolación de datos meteorológicos procedentes de otros modelos a los mismos dominios. Es capaz de incorporar datos en formato GRIB1 y GRIB2, así como datos terrestres de las categorías USGS 24 y MODIS 20. Permite el uso de las proyecciones polar estereográfica, Lambert-Conformal y Mercator. Tiene incluida la capacidad de anidamiento y trae una interfaz de usuario para incorporar datos estáticos, entre otros.

La asimilación de datos es posible en el WRF mediante el módulo WRFDA, por la importancia que tiene para el desarrollo de este trabajo se dedica el siguiente epígrafe.

En cuanto a la componente dinámico-numérica (ARW solver), se listan algunas de sus características fundamentales:

- * Sistema de ecuaciones completo no hidrostático con la opción hidrostática.
- * Términos completos de Coriolis y de curvatura.

- * Anidamiento en una y dos direcciones.
- * El espaciamiento en la vertical puede variar con la altura.
- * Discretización en mallas de tipo Arakawa C.
- * Integración en el tiempo mediante Runge-Kutta de 2do y 3er orden.
- * Condiciones de fronteras periódicas, simétricas, forzadas, entre otras.
- * Opciones físicas completas para la capa fronteriza atmosférica, la radiación en superficie y atmosférica, la microfísica y los cúmulos.

Para mayor información y profundización acerca del WRF(ARW) puede consultar el manual del mismo ([29]).

2.1.1. Módulo de asimilación WRFDA

Aunque en el capítulo anterior se describió en detalle en qué consiste el proceso de asimilación de datos, vale recordar que no es más que una técnica que combina observaciones meteorológicas con la salida de un modelo de pronóstico numérico del tiempo y la estadística que describe sus errores, para producir un estimado mejorado de la atmósfera. La salida del modelo se denomina primera aproximación o pronóstico de fondo y el estimado se conoce como análisis. El WRFDA permite la asimilación mediante los enfoques 3D-VAR, 4D-VAR y una variante híbrida que combina la asimilación variacional con ensembles. Estas técnicas de asimilación variacional se aplican mediante un proceso iterativo de minimización de una función de costo conocida, en este caso el método iterativo implementado en el módulo WRFDA es el Gradiente Conjugado. Las diferencias entre observación y análisis se ponderan acorde al error. El análisis se realiza en una malla Arakawa A que luego se interpola a la rejilla Arakawa C del WRF. El WRFDA, permite la inclusión de datos de observaciones convencionales en formato ASCII mediante la herramienta PREPBUFR. Los datos de satélite son asimilados en formato BUFR y en el caso de los radares se puede insertar el dato de reflectividad y velocidad radial en formato ASCII. En nuestro caso nos limitamos a la asimilación de las mediciones en superficie y sondeos aerológicos.

El digrama de flujo que explica el proceso de asimilación se muestra en la Figura 2.2 donde:

- x^b es el pronóstico de fondo,
- x^{lbc} las condiciones de frontera del pronóstico de fondo, construidas por el WPS y el real,
- x^a el análisis,

WRFDA in the WRF Modeling System

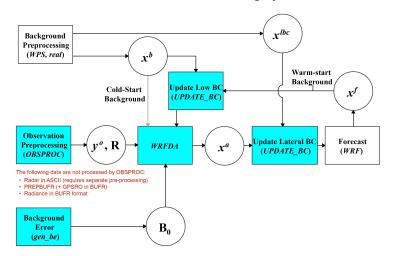


Figura 2.2: Diagrama de flujo del proceso de asimilación del WRFDA [29]

- lacksquare el pronóstico obtenido por el WRF,
- y^o las observaciones,
- lacksquare B_0 la estadística del error del pronóstico de fondo y
- lacktriangledown R es la estadística del error representativo y observacional.

Se puede observar que el WRFDA permite la asimilación de tipo cold start y warm start. En este estudio se utilizó la técnica 3D-VAR para realizar la asimilación. Más detalles acerca de este módulo se pueden encontrar en el manual del WRF.

2.2. Diseño de los experimentos

Los experimentos realizados con la finalidad de llegar a una configuración del WRF que permita un pronóstico a muy corto plazo e inmediato lo más preciso posible, parten de una configuración base ya evaluada en las condiciones físico-meteorológicas de Cuba. Esta configuración base fue diseñada por Mitrani et al.[31] para el modelo Mesoescale Model de quinta generación en su versión 3 (MM5V3). La misma fue evaluada principalmente en el pronóstico de trayectorias de huracanes [32], [33]. Los elementos fundamentales de la configuración base se describen a continuación:

- * La inicialización se basa en los datos del GFS de 1 grado utilizando 9 niveles verticales.
- * Tres dominios anidados con resolución 81, 27 y 9 km (ver Figura 2.3).
- * Proyección Lambert.

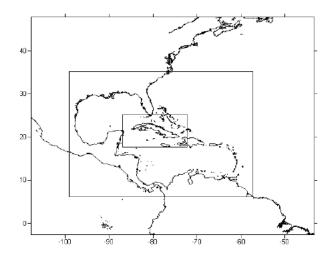


Figura 2.3: Dominios de la configuración base (tomada del MM5V3).

- * Centrados en 23N y 80W, cerca del centro del país.
- * nx = 145, ny = 82, nz = 23 (Cantidad de puntos por las x, y y z respectivamente), para el dominio de 27km y nx = 186, ny = 96, nz = 23 en el dominio de 9km.
- * Paso de integración dt = 180s.
- * Parametrización de cúmulos Grell.
- * Parametrización de Microfísica simple de lluvia no convectiva con fase de hielo.

Sobre la configuración base se realizaron los siguientes cambios y esta nueva configuración la denominaremos Conf1:

- * La inicialización se basa en los datos del GFS de 0.5 grados utilizando 26 niveles verticales.
- * Dos dominios anidados con resolución 27 y 9 km (ver Figura 2.4).
- * Proyección Lambert.
- * Centrados en 23N y 80W, cerca del centro del país.
- * Paso de integración dt = 150s.
- * Parametrización de cúmulos Grell-Freitas [23].
- * Parametrización de Microfísica WSM5.

Para los estudios referidos a la sensibilidad del modelo al cambio de parametrizaciones de microfísica y cúmulos se escogieron tres de cada tipo. Ellas son WSM5, Thompson, Morrison 2-mom en el caso

WPS Domain Configuration



Figura 2.4: Dominios de Conf1.

de la microfísica y Grell-Freitas, Kain-Fritsch y Tiedtke para los cúmulos. La selección se basó en un estudio preliminar (aún en proceso de publicación) de un caso de estudio con el que se realizaron 30 experimentos con 6 parametrizaciones de microfísicas y 5 parametrizaciones de cúmulos. Como resultado las 9 combinaciones que proponemos tuvieron el mejor comportamiento. En el epígrafe siguiente, se describen brevemente las parametrizaciones propuestas. A pesar de que se pretende llegar a un sistema de pronóstico a muy corto plazo con cuatro actualizaciones, se realizó la corrida del año 2008 con cada configuración, inicializado con el GFS análisis solamente a las 0000 UTC. Esta restricción es debido a los limitados recursos computacionales de los que se dispone.

Una vez determinada la mejor configuración de entre las 9 anteriores, se realizaron los estudios variando las condiciones iniciales, esta vez para los casos del 18 de febrero hasta el 19 de marzo de 2014, con inicialización a las 0000, 0600, 1200, 1800 UTC tomada del análisis del GFS y del pronóstico del mismo. Además para probar el impacto de la asimilación de los datos de estaciones en superficie y sondeos en el pronóstico del WRF, con el objetivo de reducir el tiempo de autoajuste, se corrió incluyendo el WRFDA. El campo de fondo fue tomado del GFS análisis a las 0000 UTC y del GFS pronóstico en el mismo horario.

2.2.1. Parametrizaciones de microfísica y cúmulos

Las parametrizaciones son un compentente clave en un sistema de Modelación Numérica del Tiempo influyendo directamente en la precisión de los modelos y en su tiempo de ejecución. En el Cuadro 2.1 se muestran las parametrizaciones de microfísica y cúmulos que se probaron en este estudio. La descripción de cada una es la que sigue:

Cuadro 2.1: Listado de experimentos variando las parametrizaciones de microfísica y cúmulos

Experimentos	Esquema de Microfísica	Esquema de cúmulos
Conf1	WSM5	Grell-Freitas
Conf2	WSM5	Kain-Fritcsh
Conf3	WSM5	Tiedtke
Conf4	Thompson	Grell-Freitas
Conf5	Thompson	Kain-Fritcsh
Conf6	Thompson	Tiedtke
Conf7	Morrison-2mom	Grell-Freitas
Conf8	Morrison-2mom	Kain-Fritcsh
Conf9	Morrison-2mom	Tiedtke

Esquemas de Cúmulos:

- 1. Esquema de Kain-Fritcsh: es un esquema de subrejilla de convección profunda y no profunda en el que incluye el **detrainment** de nube, lluvia, hielo, y nieve con persistencia de nube sobre la escala temporal convectiva [25].
- 2. Esquema Grell-Freitas: consiste en una modificación del esquema ensemble Grell-Devenyi. Definido como un método ensemble multiparámetro con 144 miembros de subrejilla. Representa explícitamente los movimientos de ascenso y descenso, e incluye el detrainment de nube y hielo [23].
- 3. Esquema de Tiedtke: es un esquema masa-flujo que incluye convección no profunda, transporte de momentum e incluye el detrainment de nube y hielo.

Esquemas de Microfísica:

1. Esquema WRF Single-Moment 5-class: Es un simple y eficiente esquema que incluye los procesos de hielo y nube acorde a mallas mesoescalares que permite procesos de fase-mixta y agua sobreenfriada.

- Esquema de Thompson: Incluye los procesos de hielo y graupel. Es ideal para las simulaciones con alta resolución [47].
- 3. Esquema Morrison double-moment: Representación del momento de segundo orden de los procesos de hielo, nieve, lluvia y graupel [35].

2.2.2. Condiciones Iniciales

El propósito de probar la sensibilidad del modelo a la variación de las condiciones iniciales, en partircular, a la inicialización con pronóstico, es reducir el tiempo de autoajuste del modelo y la espera de la disponibilidad de los datos en Internet para fines operativos. Una inicialización con pronóstico tendría resuelto. el problema del autoajuste, por lo que en la primeras horas de la corrida debe obetenerse mejor precisión. En la Figura 2.5, se muestra cómo sería la inicialización con los datos de análisis del GFS y con su pronóstico, mientras que en el Cuadro 2.2 se muestran los experimentos realizados denominados Conf10-17, siguiendo la notación anterior. En estas configuraciones solo se varió la inicialización, el resto de los elementos quedaron según la Conf1-9 que mejores resultados presentó.

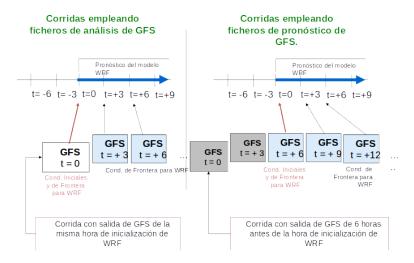


Figura 2.5: Corridas con inicialización a partir del GFS análisis y el GFS pronóstico

Estas configuraciones fueron corridas para los días del 18 de febrero hasta el 19 de marzo de 2014.

Otro detalle no menos importante que nos motiva a realizar estos estudios de sensibilidad es que, para el uso operativo de los datos de análisis del GFS los cuales se descargan de Internet, es necesario esperar entre 5 y 6 horas por su disponibilidad en la red. Por ejemplo los datos de las 0000 UTC están listos casi a media noche. Esto implica que ya el sistema de pronóstico que deseamos implementar tendría un retraso de 6 horas, más el tiempo de corrida del modelo que, para los dominios que presentamos, varía entre 30 minutos y 120 minutos dependiendo de la parametrización de microfísica. Si se utilizan los datos de

Cuadro 2.2: Listado de experimentos realizados variando la inicialización.

Experimentos	Hora de Inicialización (UTC)	Tipo de Inicialización	Datos del GFS a emplear
Conf10	0000	análisis	0000
Conf11	0000	pronóstico	1800
Conf12	0600	análisis	0600
Conf13	0600	pronóstico	0000
Conf14	1200	análisis	1200
Conf15	1200	pronóstico	0600
Conf16	1800	análisis	1800
Conf17	1800	pronóstico	1200

pronóstico estaríamos ganando ese tiempo, lo que nos permitiría añadir dominios de más alta resolución sin aumentar la capacidad computacional.

Para evaluar las configuraciones Conf10-17, se realizó una verificación puntual con datos de estaciones en superficie, utilizando los estadígrafos Error Cuadrático Medio y el Coeficiente de Correlación de Pearson cuyas expesiones se incluyen más adelante.

2.2.3. Asimilación de Datos

Para la asimilación en el modelo de WRF mediante el WRFDA, se utilizaron las observaciones METAR y sondeos localizados en toda la región que comprende al dominio de más baja resolución (27km). Estos datos están disponibles en tiempo real en los sitios [53], [52] y se descargan un total de 1541 datos de observaciones en superficie y 68 sondeos aerológicos. En la Figura 2.8 se muestra la ubicación espacial de los datos utilizados. Estos datos no se encuentran en el formato en el que el WRFDA recibe la información por lo que se realizó un script en Python para su transformación al formato LITTLE_R. En la Figura 2.6 se muestra el esquema de asimilación utilizado. El subprograma OBSPROCESOR, es el encargado eliminar las observaciones fuera del dominio espacial y temporal (entre una hora antes y una hora después), elimina la observaciones duplicadas quedándose con la de mejor calidad y para el caso de las observaciones en varios niveles verticales, comprueba que no exista incosistencia física. Después de este preprocesamiento, el OBSPROCESOR escribe al formato que requiere el WRFDA.

En los experimentos realizados con asimilación se tomó como primera aproximación los datos del GFS análisis y pronóstico en el horario de las 0000 UTC. De esta forma se declaran las configuraciones Conf18-21 como se muestra en el Cuadro 2.2.3. Los casos simulados se tomaron entre el 18 de frebrero y 19 de marzo de 2014. De igual forma se realizó una evaluación puntual con datos de estaciones en superficie.

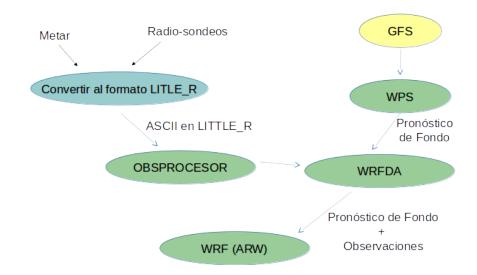


Figura 2.6: Esquema que muestra el proceso de asimilación de datos con el WRFDA

Cuadro 2.3: Listado de experimentos realizados con asimilación

Experimentos	GFS	Asimilación
Conf18	análisis	Si
Conf19	pronóstico	Si
Conf20	análisis	No
Conf21	pronóstico	No

2.3. Evaluación

Cada una de las configuraciones antes descritas fueron evaluadas para determinar la que mejor se ajusta a las condiciones físco-meteorológicas de Cuba y a las condiciones materiales que se tienen. La evaluación de las salidas de modelos de pronóstico del tiempo agrupa un conjunto de técnicas matemáticas que van desde la estadística tradicional que comunmente se aplica a variables continuas como la temperatura y el viento, hasta métodos espaciales que permiten la verificación de variables discretas como la precipitación y la nubosidad. Entre los enfoques de evaluación más utilizados se encuentran la evaluación celda-punto y la evaluación espacial, ambos usados en el presente trabajo. La selección de los mismos se basó en los tipos de observaciones con que se contó para realizar la verificación. Más detalles acerca de las formas de evaluación se encuentran en [17].

Para la verficación puntual se utilizaron los datos de las estaciones en superficie del país y la aplicación de la verificación espacial se basó en los datos del TRMM-PR. A continuación se explica dentro de cada enfoque aplicado las técnicas e índices utilizados.

2.3.1. Verificación celda-punto

La metodología celda-punto es aplicable cuando se dispone de datos puntualues los sondeos, las boyas y las estaciones en superficie. En este trabajo se contó con los datos de estaciones. En esta variante se comparan los valores puntuales con las celdas del modelo que se correspondan. De no coincidir, se interpola la salida del modelo a las coordenadas de la estación. La interpolación en esta investigación fue realizada mediante el método de spline cúbico. Una vez interpolados los datos, es posisble el cálculo de diferentes estadígrafos. En este estudio fueron utilizados el Error Absoluto Medio ($mae\ 2.1$), el Error Cuadrático Medio ($mse\ 2.2$), el Error Relativo Medio($mre\ 2.3$), las Desviación Estándar ($std\ 2.4,\ 2.5$), el Coeficiente de Ajuste ($ai\ 2.6$) y el Coeficiente de Correlación de Pearson($pcor\ 2.7$). Las expresiones de cada uno se escriben seguidamente, para ello se adopta la notación, O observación, P pronóstico, N cantidad de datos a comparar, el error está dado por e=O-P y una barra superior indica valor medio.

$$mae = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} |e_i| \tag{2.1}$$

$$mse = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (e_i)^2$$
 (2.2)

$$mae = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \frac{(e_i)}{O_i} * 100$$
 (2.3)

$$std(O) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (O_i - \overline{O})^2}$$
(2.4)

$$std(P) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (P_i - \overline{P})^2}$$
 (2.5)

$$ai = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{N} (e_i)^2}{\sum_{i=1}^{N} ((O_i - \overline{O}) + (P_i - \overline{O}))^2}$$
(2.6)

$$pcor = \frac{\sum_{i=1}^{N} (O_i - \overline{O})(P_i - \overline{P})}{std(O)std(P)}$$
(2.7)

Estos estadígrafos fueron utilizados en la evaluación de las variables temperatura, presión, humedad relativa, fuerza del viento y precipitación.

2.3.2. Verificación espacial

La verificación espacial es muy útil par el estudio de variables discretas. Dentro de esta metodología existen varias técnicas como son: la lógica difusa, la aplicación de funciones wavelet para relacionar intensidad con escala, el Fraction Skill Score (fss) que permite determinar para varios tamaños de ventana y umbrales la fracción de esta que coinde entre el pronóstico y la observación, los métodos orientados a objeto que detectan características similares en la observación y el pronóstico, entre otros. En esta investigación utilizamos el fss y el MODE(Method for Object based Diagnostic Evaluation) para realizar la evaluación espacial. Se utilizaron como observación los datos del TRMM-PR.

Fraction Skill Score

Este índice permite conocer la habilidad del modelo para distintas escalas espaciales y para distintos valores de la variable estudiada. Por ejemplo para el caso de la lluvia se puede conocer su habilidad para pronósticar distintas intensidades. Se basa en la estrategia vecindad-observación - vecindad-pronóstico. El término vecindad se refiere a una ventana alrededor de una celda determinada. Definiendo X como el valor observado para una celda y Y el valor pronósticado en la misma celda, la vecindad de esta celda se denota $\langle \rangle_s$, siendo s la escala.

El fss se basa en la fracción de celdas que en una vecidad sobrepasan un umbral, las expresiones 2.8 y 2.9 muestran cómo se calcula la misma para lo observado y lo pronosticado respectivamente;

$$\langle P_x \rangle_s = \frac{1}{n} \sum_n I_x \tag{2.8}$$

$$\langle P_y \rangle_s = \frac{1}{n} \sum_y I_y, \tag{2.9}$$

siendo I_x e I_y indicadores que valen 1 o 0 si en la celda se sobrepasa el umbral o no, y n es el número de celdas en la vecindad o ventana.

Teniendo en cuenta lo anterior el fss se define como:

$$fss = 1 - \frac{fbs}{\frac{1}{N} \left[\sum_{N} \langle P_y \rangle_s^2 + \sum_{N} \langle P_x \rangle_s^2 \right]},$$
 (2.10)

donde N es el número de ventanas y fbs esta dado por la fórmula

$$fbs = \frac{fbs}{\frac{1}{N} \sum_{N} (\langle P_y \rangle_s - \langle P_x \rangle_s)^2}.$$
 (2.11)

Finalmente para la aplicación de éste método se seleccionan los umbrales ϵ y las escalas s a estudiar. En el presente trabajo se evaluó la variable precipitación con esta metodología tomado $\epsilon = 0, 1, 0, 5, 2, 5, 10, 20$ y 50mm para vecindades de tamaño s = 1, 3, 5, 7 y 9.

MODE

El enfoque orientado a objetos permite conocer cuánto el pronóstico se acerca a la observación en su estructura espacial. Se identifican áreas en cada campo (observación y pronóstico) a las cuales se le calculan ciertas propiedades geométricas que permiten establecer una correspondencia entre las áreas u objetos. Entre las propiedades que se utilizan y que se denominan también atributos se encuentran: el centroide, el perímetro, el área, la orientación, la relación de aspecto, entre otros. Para determinar los objetos que pueden ser asociados dentro de un mismo campo, y entre un campo y otro se utiliza un algoritmo de lógica difusa.

Para la identificación de objetos se sigue el siguiente procedimiento (ver Figura 2.7):

- Se suavizan los campos por medio de una convolución con una función filtro circular. Este paso permite agrupar áreas cercanas entre si disminuyendo el número de objetos.
- 2. Luego se aplica un umbral ϵ_{mode} en la observación y el pronóstico generando un campo con 1 en las celdas que sobrepasen el umbral y 0 en el resto.
- 3. La máscara de ceros y unos obtenida anteriormente se aplica a los campo originales.
- 4. Se calculan los atributos.
- 5. Se fusionan los objetos de un mismo campo mediante un algoritmo de lógica difusa.

El algoritmo de lógica difusa emplea funciones lineales de interés para calcular los valores de interés I de cada atributo, este valor se encuentra entre 0 (sin interés) y 1 (interés máximo). Además se calculan los valores de confianza C y se definen los pesos w que se asignan a cada atributo según su importancia. El interés total queda determinado por la expresión,

$$T(\alpha) = \frac{\sum_{i} w_{i} C_{i}(\alpha) I_{i}(\alpha)}{\sum_{i} w_{i} C_{i}(\alpha)}$$
(2.12)

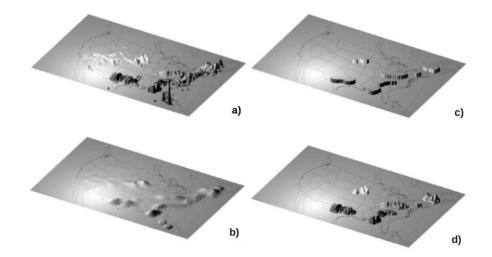


Figura 2.7: Proceso de identificación de objetos en el MODE [30]

Una vez calcula el interés total los pares de objeto que sobrepasen de un valor determinado del mismo son fusionados. Este mismo mecanismo se aplica además para determinar los objetos del pronóstico que se corresponden con la observación.

A partir de los objetos detectados y asociados o no entre la observación y el pronóstico se pueden calcular el Índice de Éxito Crítico (CSI 2.13) y la Probabilidad de Detección (POD 2.14).

$$CSI = \frac{aciertos}{aciertos + fallos + falsasalarmas} \tag{2.13}$$

$$POD = \frac{aciertos}{aciertos + fallos} \tag{2.14}$$

Esta forma de evaluación está implementada en el MET (Model Evaluation Tool) [30] y en el paquete de verificación espacial del software R. Sin embargo para su utilización fue necesario implementarla ya que los softwares anteriores o no tienen compatibilidad con los datos con que contamos o su ejecución es demasiado costosa computacionalmente. La versión implementada se denomina MODEMODv1.0. Esta estrategia también fue aplicada utilizando como observación los datos del TRMM-PR. El umbral de interés para asociar objetos se tomó como 0.7. Para mayor información acerca del MODE consulte la siguiente bibliografía [30] y algunos resultados obtenidos con la versión implementada se encuentran en [44], [45].

2.4. Datos utilizados y período de estudio

En esta sección se realiza una breve descripción del período de estudio seleccionado para la realización de los experimentos. Las Conf1-9 fueron corridas con los datos del GFS del año 2008 mientras que el resto de las configuraciones se probaron con los días de 18 de febrero hasta el 19 de marzo de 2014. En el caso de las corridas con asimilación se utilizaron también los datos de estaciones en superficie y sondeos descargados del sitios [53], [52] y cuya localización se observa en la Figura 2.8. Para la evaluación celda-punto se utilizaron los datos de la Red de Estaciones Meteorológicas de Cuba que; de 68 estaciones en total, fueron tomadas 54 para evaluar Conf1-9 y 46 para Conf10-21 (ver Figura 2.9 (a) y (b) respectivamente). Las razones por las que se descartaron algunas estaciones fueron: valores no reales de las variables y discontinuidad en la serie. Para la evaluación espacial se utilizaron los datos del satélite TRMM-PR.



Figura 2.8: Puntos de observación [53], [52]

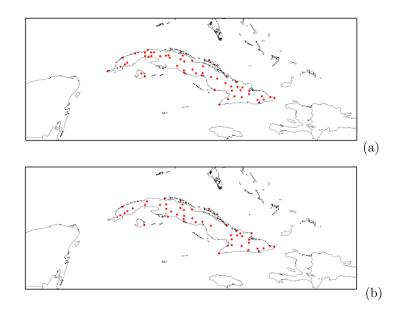


Figura 2.9: Red Nacional de estaciones Meteorológicas

2.4.1. Descripción de los períodos de estudio

18 de febrero - 19 de marzo de 2014

En el mes de febrero afectaron los frentes fríos número 12 y 13 al archipiélago cubano. Fueron clasificados como clásicos por sus tipos, mientras que por la intensidad fueron moderado el 12 y muy débil, el 13. Una masa de aire de origen continental polar influyó sobre Cuba los días 16 y 17 de febrero, imponiendo condiciones invernales moderadas con registros de temperaturas mínimas del orden de los 13.0 grados Celsius y un valor absoluto de 7.2 Celsius en la estación meteorológica de Indio Hatuey, provincia Matanzas, el día 17 de febrero. También se presentaron días cálidos y algo húmedos, con vientos de región sur débiles y moderados. Febrero presentó un comportamiento pluviométrico alejado de las condiciones climáticas. El análisis de los registros de las lluvias, permite expresar que en las provincias de Sancti Spiritus y Las Tunas, se registraron acumulados mensuales superiores a los valores climáticos; mientras que clasificaron como lluviosas, Artemisa, La Habana, Mayabeque, Matanzas, Cienfuegos, Camaguey, Holguín y el Municipio Especial Isla de la Juventud; y se registraron solo aisladas lluvias en Pinar del Río, Villa Clara, Santiago de Cuba y Granma. En casi todas las provincias cubanas se presentaron anomalías positivas en el campo térmico, considerando los valores medios de la temperatura del aire y las extremas.

Por otra parte en el mes de marzo del 2014 afectaron al archipiélago cubano cinco frentes fríos, este número representa una anomalía positiva con relación al valor climático mensual de afectación de esos sistemas invernales a Cuba. Estos fueron clasificados por sus intensidades en tres moderados y dos débiles. Los cinco fueron del tipo clásicos. Tres de ellos estuvieron precedidos por hondonadas activas que estaban acompañadas de lluvias, chubascos y tormentas eléctricas. También se impusieron vientos de región sur, que ocasionaron rachas superiores a los 60 km/h como la registrada en la estación meteorológica de Casablanca, en la provincia La Habana, y otra de 83 km/h, el día 16 de marzo, la que estuvo asociada al paso previo del sistema frontal número 16 de la temporada invernal. Para más detalles ver [21].

Año 2008

Durante el año 2008, las situaciones meteorológicas más significativas ocurrieron durante la temporada ciclónica. Cuba fue afectada por cuatro ciclones tropicales: una tormenta tropical (Fay) y tres huracanes (Gustav, Ike y Paloma). En el caso de los huracanes Gustav y Ike esta fue la primera vez que el país ha sido afectado por dos huracanes intensos con tan pocos días de diferencia. Otro rasgo muy significativo del clima en este año, fue el déficit de precipitación ocurrido en gran parte del territorio nacional, en meses del período estacional poco lluvioso e incluso en meses del período lluvioso, como lo fueron mayo, junio y octubre. Los déficit más significativos de éstos meses, se originaron en provincias de las regiones central y oriental y amplios sectores de la provincia de Pinar del Río. Este comportamiento de las lluvias dio lugar a que comenzara a afectar un nuevo evento de sequía a gran parte del país en especial su región más oriental. Las lluvias posteriores asociadas a los huracanes interrumpieron el mismo.

Otro aspecto a destacar lo constituyen las bajas temperaturas registradas en el mes de noviembre en todo el territorio nacional, cuando llegaron al país cinco frentes fríos, valor superior a la media histórica para

este mes. Las temperaturas máximas medias de noviembre estuvieron muy por debajo de su valor normal fundamentalmente en las regiones occidental y central, llegando a ser la más baja registrada, para toda Cuba desde el 1951 a la fecha, con un valor de 27.4 grados Celsius. Solo en 5 días la temperatura máxima superó la media histórica para el mes. En correspondencia ocurrieron significativas anomalías negativas de la Temperatura Efectiva (TE) en todo el país durante el mes, resultando el más fresco del período analizado (1971-2008). La estación de Casablanca, reportó el valor más bajo de temperatura máxima media desde 1961 hasta la fecha. Durante el principio del año 2008 Cuba fue afectada por 13 sistemas frontales entre enero y abril de este año, donde se registraron algunos récords de temperaturas mínimas.

En el caso de la temporada ciclónica en la Figura 2.10 se muestran todas las trayectorias de los ciclones tropicales que se formaron durante el año 2008 en la cuenca del océano Atlántico. Profundice en [8], [21].

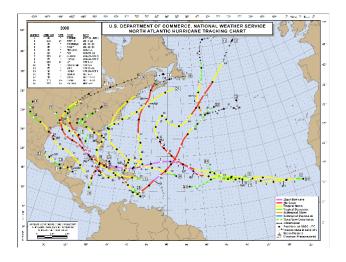


Figura 2.10: Trayectorias de huracanes [8]

2.4.2. Satélite Meteorológico TRMM-PR

El TRMM (TROPICAL RAINFALL MEASURING MISSION) [54], es un producto conjunto de la NASA con la Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa. Este equipo de trabajo desarrolla herramientas que combinan y analizan la precipitación de fuentes terrestres y espaciales. En la Figura 2.11 se muestran los productos que se publican. En el contexto de este trabajo se utilizó el producto Análisis de Precipitación Multisatélite con resolución 25 km y acumulados cada 3 horas e identificado como 3B42RT. Este producto combina datos de microondas, infrarojo y de radares. En el Cuadro 2.4.2 se describen sus características:

Cuadro 2.4: Características del 3B42RT.

Cobertura temporal	Inicio: 01/01/2008 hasta la actualidad			
Cobertura espacial	Latitud: 60° S - 60° N; Longitud: 180° W - 180° E			
Resolución temporal	3 horas			
Resolución horizontal	$0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$; nlat = 480, nlon = 1440			

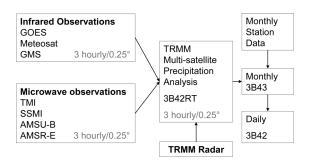


Figura 2.11: Esquema de procesamiento y salida de los productos del TRMM 2.11

Capítulo 3

Discusión de los Resultados

En esta sección se describen los resultados alcanzados durante la ejecución y evaluación de los 21 experimentos diseñados y descritos en el capítulo anterior. La evaluación utilizada para determinar cuál configuración tiene mejor comportamiento, según la combinación de microfísica y cúmulos seleccionada, se basó en la metodología celda-punto aplicada a la precipitación en ambos dominios; y la espacial se utilizó solo en el dominio 1 cuya resolución de 27 km es bastante cercana a los datos del TRMM-PR (25km). Para el caso de los experimentos variando condiciones iniciales (Conf-10-17) e insertando la asimilación de datos (Conf18-21), se aplicó el enfoque puntual solamente al dominio 2, y se evaluaron las variables temperatura, presión atmosférica en superficie, humedad relativa, fuerza del viento y la precipitación.

3.1. Estudios de sensibilidad. Parametrizaciones de Microfísica y cúmulos

De las configuraciones diseñadas para determinar la mejor configuración de microfísica y cúmulos (Conf1-9 ver Cuadro 3.1.1) fueron descartadas Conf3 y Conf6. En estas el factor común es el esquema de cúmulos de Tiedtke. Las corridas realizadas con estas configuraciones terminaban de forma abrupta. En una consulta al blog de los desarrolladores del WRF, se encontraron otros resultados similares sin respuesta al respecto. Por otro lado fueron descartadas también las configuraciones Conf7, Conf8 y Conf9 debido al tiempo de ejecución que toma la parametrización de microfísica de Morrison-2mom. Aunque se busca encontrar la combinación más precisa no podemos descartar el tiempo de corrida pues en un sistema de pronóstico a muy corto plazo e inmediato, se pretende entregar la información lo más en tiempo real posible. En el caso de las corridas con microfísica de Morrison-2mom, estas excedían el tiempo de corrida con respecto a WSM5 (la más rápida), hasta en 40 minutos. Finalmente se presentan los resultados evaluando Conf1,

Experimentos

W5-GF

W5-KF

T-GF

T-KF

3.1.1. Resultados para el dominio 1

201990

El dominio 1 (ver Figura 2.4) con resolución de 27 km, es ideal para el estudio y seguimiento de fenómenos a escala sinóptica como los frente fríos y los huracanes que tanto afectan al país. En estas escalas espaciales los esuquemas de cúmulos tienen un peso importante en el pronóstico de la precipitación pues los cúmulos están en una escala muy pequeña con respecto a la que estamos tratando. En el Cuadro 3.1.1 se muestra el acumulado anual y los estadígrafos antes descritos, para cada una de las configuraciones utilizadas y cuya notación cambiamos para una mejor lectura de la sección; Conf1: W5-GF, Conf2: W5-KF, Conf4: T-GF y Conf5: T-KF. Destaca la sobrestimación del acumulado anual por todas las configuraciones con mayores valores para aquellas en las que se utiliza el esquema de cúmulos de Kain-Fritsch.

Acum P (mm)Acum O (mm) std(P)std(O)maemsemreaipcor140730 67026 -541.6 4.97 3.59 0.47 1.16 26.40.32179210 67026 1.4 24.2-637.94.553.59 0.450.31163760 67026 1.46 60.8-713.48.08 3.59 0.370.30

-428.4

5.91

3.59

0.06

0.03

46.9

1.9

Cuadro 3.1: Comportamiento anual. Dominio 1

67026

En cuanto a las medidas de error no existe una marcada diferencia entre cada configuración. El error relativo medio es bastante grande para todos los esquemas utilizados sugiriendo poca habilidad del modelo para pronósticar los acumulados de lluvia. Si observamos el índice de ajuste ai, podemos determinar que W5-GF es la que tiene un mejor comportamiento anual, teniendo en cuenta que este índice condensa todas las diferencias. Para W5-GF, W5-KF y T-GF se obtiene una correlación de 0,3 que indica cierta relación lineal directa con la observación. No ocurre así con T-KF cuya correlación es casi cero por lo que no existe un relación lineal entre los valores observados y los pronósticados por esta combinación.

Si analizamos los resultados mensualmente, en la Figura 3.1 se muestran los acumulados (a) y las desviaciones estándar (b) mensuales. El pronóstico realizado por todas las configuraciones sobrestima el acumulado real, con la mayor diferencia en los meses del período lluvioso y además presentan los mayores acumulados en los meses Junio y Septiembre como normalmente ocurre. De manera general todos los experimentos reflejan el comportamiento mensual de la lluvia acorde con lo observado. En este gráfico se observa, que cuando las observaciones registran un aumento en los acumulados; W5-GF, W5-KF y T-GF también lo hacen, mientras que T-KF no tiene la misma regularidad en el aumento. Esta última incluso presenta un disminución clara del acumulado en el mes de Agosto. Este resultado se confirma con los valores de la correlación (ver Figura 3.3 (b)). Los mayores errores (Figura 3.2) se presentan en los meses de Julio a Noviembre, período enmarcado en la temporada ciclónica del año que fue muy activa.

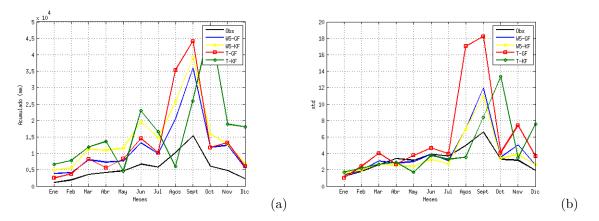


Figura 3.1: (a) Acumulado mensual, (b) Desviación estándar. Dominio 1

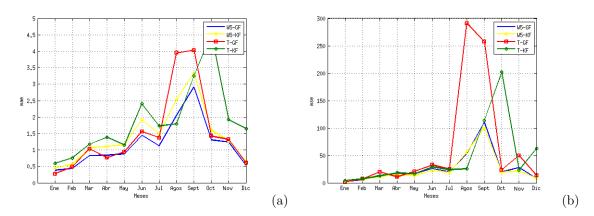


Figura 3.2: (a) Error Absoluto Medio, (b) Error Cuadrático Medio. Dominio 1

Los mayores acumulados en ese periódo se deben entre otras causas al paso de varios huracanes por el territorio nacional. Lo anterior indica que ninguna de las configuraciones refleja adecuadamente la lluvia aportada por estos meteoros. El experimento que menores errores presentó con mae = 3 y mse = 120, fue W5-GF.

Por otro lado, analizando el índice de ajuste (Figura 3.3 (a)), se destacan los valores bajos que alcanza T-KF. Esta configuración pierde precisión en el período lluvioso donde alcanza el mínimo ai=0,04. El resto de las configuraciones, mostraron un ajuste relativamente parejo mejorando la precisión de Julio a Septiembre con valores mayores que 0,5. Estos resultados indican que durante el período seco, el modelo en cualquiera de sus variantes aunque tiene menores errores absoluto medio y cuadrático medio, es menos preciso y no es posible determinar una relación lineal con respecto a las observaciones. Para el período lluvioso sin embargo, se alcanzan las mayores diferencias pero el comportamiento del modelo es lineal directo en relación con lo observado y presenta el mejor ajuste. Por lo que se concluye que exceptuando T-KF, el resto de las configuraciones tienen mejor comportamiento en el período lluvioso con ligera ventaja para W5-GF.

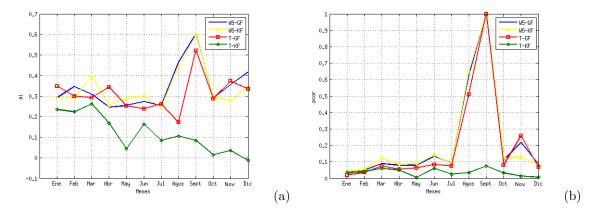


Figura 3.3: (a) Índice de Ajuste, (b) Correlación de Pearson.

Además del estudio mensual, se analizó cada configuración para los horarios en los que se hacen las observaciones. Vale aclarar que debido a que los experimentos fueron inicializados a las 0000 UTC y el tiempo de pronóstico fue de 24 horas, no se contempló el último plazo de observación por lo que no se pudo evaluar. Este gazapo sin embargo no influye en los resultados del trabajo pues las horas de interés son las cercanas a la inicialización del modelo.

Según lo observado (Figura 3.4), los mayores acumulados se presentan en el horario de la tarde, y este comportamiento lo reflejan adecuadamente todas las configuraciones excepto T-KF que fluctúa de un horario a otro. Esto se puede comprobar mejor en el gráfico de la desviación estándar. Igualmente todas las configuraciones sobrestiman los acumulados con la mayor diferencia hacia el horario vespertino.

Las medidas de error (ver Figura 3.5, indican que el modelo se comporta mejor en los horarios más cercanos a la hora de inicialización algo que para nuestra finalidad sería muy bueno. Sin embargo, no debemos confiar ciegamente, el tiempo de autoajuste del modelo puede estar falseando este resultado ya que, la lluvia no se encuentra entre las variables con las que se inicializa el modelo. Esto significa que durante el período de autoajuste debe generarse y por ello quizás se tengan menores diferencias con respecto a las observaciones y no porque así lo pronostique el modelo. El índice de autoajuste muestra la misma situación, en los horarios cercanos a la inicialización alcanza valores de hasta 0,7 con el mejor comportamiento para W5-GF y el peor para T-KF.

Hasta este punto, se puede resumir que todas las configuraciones utilizadas presentan una marcada sobreestimación de los acumulados de preicipitación. Este resultado preliminar, contradice otras investigaciones en las que por lo general se reporta que con resoluciones como 27km, los modelos subestiman esta variable. En nuestro caso, el resultado puede estar influenciado por el enfoque de evaluación celda-punto, en el que se interpolan los valores pronosticados a las latitudes y longitudes de las estaciones, pero los estadígrafos se calculan promediando el valor de todas las estaciones; anualmente, mesualmente y por horario, perdiendo la relación espacial. Esto unido a que, si bien los modelos subestiman la intensidad

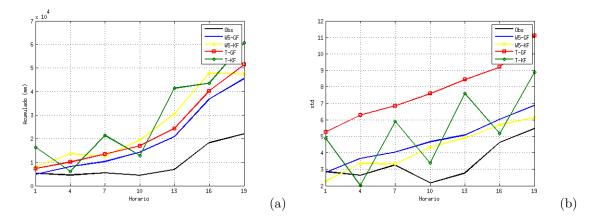


Figura 3.4: (a) Acumulado horario, (b) Desviación estándar. Dominio 1

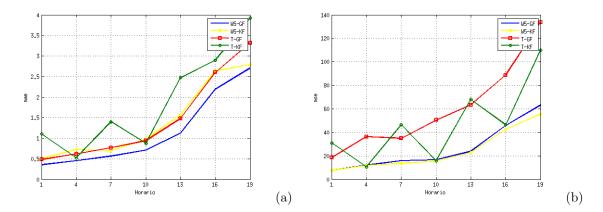


Figura 3.5: (a) Error Absoluto Medio, (b) Error Cuadrático Medio. Dominio 1

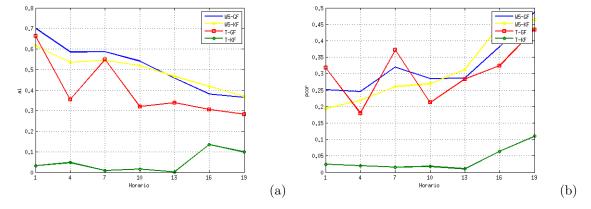


Figura 3.6: (a) Índice de Ajuste, (b) Correlación de Pearson. Dominio $1\,$

de la lluvia, espacialmente tienden a sobreestimarla. Lo anterior significa que comunmente las áreas de precipitación pronósticadas por el modelo son mayores que las reales. Cuando aplicamos la verificación celda-punto y se interpola a las coordenadas de la estación, influyen los valores de las celdas cercanas que contribuyen al valor del punto y que pueden causar la sobreestimación. Como las celdas son áreas de 27x27km, se incluyen valores que no son representativos de la ubicación de la estación. Veamos el comportamiento espacial de la lluvia que se obtiene con esta metodología de evaluación.

Si se interpolan los resultados obtenidos a las coordenadas del modelo se obtiene un mapa medio de la cantidad interpolada. De esta forma es posible ver cómo reacciona espacialmente el modelo con las distintas configuraciones. La Figura 3.7 (a), muestra los mapas de acumulados obtenidos para todo el año. Se observa en la mayoría del territorio, que esta cantidad no pasó de 2000 mm, con los mayores acumulados en la mitad occidental. Las configuraciones estudiadas reflejan también una sobreestimación de la precipitación aunque en menor medida que los gráficos vistos hasta el momento. Esto refleja la sensibilidad espacial de la precipitación. La configuración con acumulados más cercanos a lo observado fue W5-GF, la cual presenta los mayores acumulados también localizados en la mitad occidental aunque el mayor valor lo refleja en la región central del país. En segundo lugar se encuentra T-GF, que presentó la misma ubicación espacial de los mayores acumulados pero con mayor sobreestimación. En cuanto a los experimentos con W5-KF y T-KF, se observa no solo una sobreestimación con respecto a las configuraciones analizadas anteriormente sino también, una desacertada localización espacial de los mayores acumulados. Estos resultados indican que la parametrización de cúmulos Grell-Freitas refleja mejor la distribución espacial de la lluvia. El hecho de que haya situado los mayores acumulados hacia la mitad occidental y el centro del país, indica que se modeló adecuadamente el paso de los huracanes por esta zona. Por ejemplo el huracán Ike afectó fuertemente casi todo el territorio nacional con gran impacto en estas regiones, y en las mismas W5-GF y T-GF presentaron acumulados significativos. En las Figuras (3.11 (a) y (b) de los Anexos) se muestra la trayectoria del huracán Ike pronósticada por el WRF con la configuración W5-GF y los errores con respecto al Best Track. Se puede observar que con respecto al best track las diferencias fueron pequeñas en las primeras horas de pronóstico. En el caso de W5-KF y T-KF los acumulados indican un corrimiento en el recorrido seguido por los huracanes.

Pasando a la verificación espacial, veamos los resultados que se obtienen con la aplicación del MODE como herramienta que caracteriza la habilidad del modelo para pronosticar las áreas de precipitación y el grado de correspondencia de éstas con las áreas que fueron registradas por el TRMM-PR. En el Cuadro 3.1.1 se resumen los estadígrafos calculados basados en los objetos detectados en uno y otro campo, el índice de interés total medio y la cantidad de pares de objetos que fueron asociados con interés total mayor que 0,9. Es importante recordar que el interés total es una medida que indica cuánto se parecen los objetos asociados en cuanto a diferentes propiedades geométricas y su localización espacial.

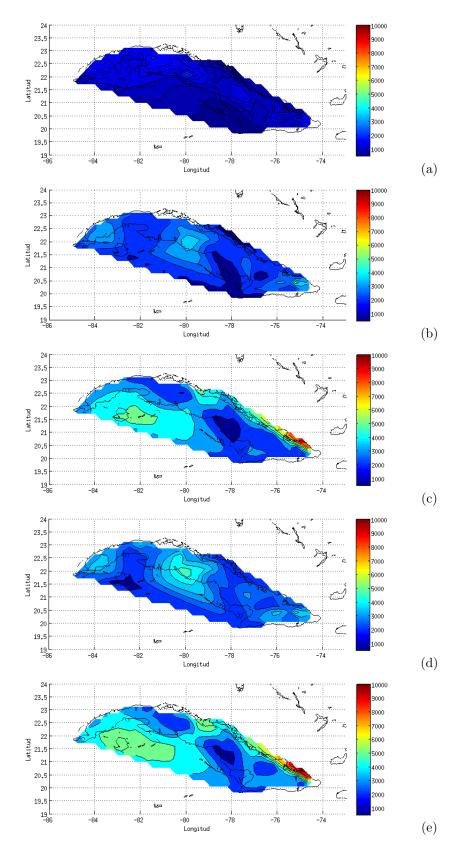


Figura 3.7: Acumulado (mm): (a) Observaciones, (b) W5-GF, (c) W5-KF, (d) T-GF, (e) T-KF. Dominio $1\,$

Cuadro 3.2: Resultados obtenidos con el MODE FAR | CSI | POD | Interés Total | Cant >= 0.9

[Conf	FAR	CSI	POD	Interés Total	Cant >= 0.9
	W5-GF	0.7245	0.1134	0.1702	0.8173	1494
	W5-KF	0.6976	0.1111	0.1823	0.8155	1304
	T-GF	0.7461	0.0972	0.1452	0.8118	1014
	T-KF	0.7730	0.1084	0.1823	0.8145	1534

Como es posible observar, la diferencia entre las distintas configuraciones no es muy amplia aunque se evidencia una ligera superioridad de W5-GF con respecto al resto. El índice de éxito crítico por debajo de 0,2 en todos los experimentos, sugiere que el modelo tiene muy poca habilidad en la representación espacial de áreas de lluvia. Valores pequeños del mismo indican que existen muchas falsas alarmas y fallos, esto lo confirma el FAR, el cual está por encima de 0.69 en todos los casos. El valor de éxito crítico también refleja que son pocos los pares de objetos asociados entre sí, aunque el interés total medio indica que por lo general los pares de objetos asociados tienen características muy similares y es W5-GF quien presenta los objetos más parecidos a la observación. Además es la segunda configuración con mayor cantidad de pares correspondientes con interés total por mayor o igual que 0,9. Llama la atención que como resultado de la aplicación de la metodología celda-punto, T-KF resultó la que peor comportamiento presentó, sin embargo con esta técnica espacial resulta la segunda mejor. Otra medida espacial que nos describe la habilidad del modelo en el pronóstico de distintos umbrales de intensidad es el fss (ver Figura 3.8). Normalmente los modelos presentan mejor habilidad para umbrales pequeños de intensidad y para mayores de la misma pierden precisión. Este comportamiento se observa en el fss calculado para todos los experimentos. Para umbrales menores que 0,5 mm el modelo tiene mejor habilidad de pronóstico. Asimismo a medida que se incrementa la escala, es decir se pierde resolución, se obtiene un mejor comportamiento.

Este índice de evaluación también muestra a la configuración W5-GF con los mejores resultados. Para escalas igual a 1 y umbral de 0,1 mm obtiene un valor entre 0,5 y 0,6. Aumentando la escala y el umbral, mantiene la superioridad. Lo anterior señala que esta configuración es posible utilizarla para diferentes resoluciones obteniéndo un buen comportamiento. En este caso T-GF obtuvo los peores resultados.

Resumiendo los resultados obtenidos para el dominio 1 con cada combinación de microfísica y cúmulos, se puede decir que el enfoque puntual arroja una sobreestimación de los acumulados que se observa también en los mapas de la distribución espacial de la lluvia. Tanto este enfoque como el espacial coinciden en que la parametrización de cúmulos Grell-Freitas tiene los menores errores, mayor índice de ajuste y la mejor distribución espacial de las áreas de precipitación.

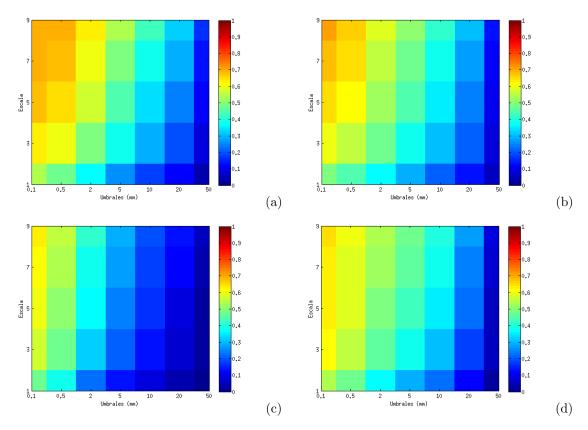


Figura 3.8: Fraction Skill Score. W5-GF (a), W5-KF (b), T-GF (c), T-KF (d). Dominio 1

3.1.2. Resultados para el dominio 2

El dominio 2 tiene una resolución de 9 km y es posible aquí observar con más detalles la lluvia asociada a fenómenos locales, por ejemplo la precipitación producida por el calentamiento diurno y la convergencia de brisas. Para evaluar este dominio se utilizó la estrategia celda-punto pero no se aplicó la verificación espacial. Lo último es debido a que para aplicar esta técnica se tomó como observación los datos del TRMM-PR cuya resolución es casi 3 veces más baja que la de este dominio. Esto implica realizar una interpolación de 9km a 25km con la que se suaviza el valor de la precipitación y se pierde su estructura espacial. La aplicación de esta técnica requerirá de datos de obsevación con mayor resolución. Los gráficos que muestran los resultados obtenidos con este dominio se encuentran en los Anexos.

En el Cuadro 3.1.2, se muestran las medias anuales de los distintos estadígrafos utilizados. Este dominio no escapa a la sobrestimación de los acumulados, de hecho es mayor que en el dominio 1. Normalmente cuando se aumenta la resolución el modelo aumenta la capacidad de pronosticar con más precisión la intensidad de la lluvia, por lo que este comportamiento es consecuente.

Como ocurrió en el dominio 1 el acumulado total es excedido en un orden de magnitud. Con el mejor ajuste para aquellas configuraciones con Grell-Freitas como parametrización de cúmulos. Para el caso de W5-KF y T-KF el ajuste fue muy bajo con una correlación menor que 10^{-2} , lo cual es indicador

Cuadro 3.3: Comportamiento anual. Dominio 2

Experimentos	Acum P (mm)	Acum O (mm)	mae	mse	mre	std(P)	std(O)	ai	pcor
W5-GF	140880	67026	1.18	33.6	-533.96	5.71	3.59	0.42	0.29
W5-KF	193940	67026	1.76	41.7	-656.05	5.65	3.59	0.14	0.08
T-GF	132570	67026	1.77	101.9	-635.54	10.277	3.59	0.24	0.21
T-KF	226650	67026	2.40	64.3	-504.65	7.13	3.59	0.045	0.03

de cuando no existe relación lineal ninguna entre los pronosticado y los observado. También los errores relativos indican poca habilidad del modelo. Según el comportamiento anual no existe un valor agregrado al aumentar la resolución.

Por otro lado analizando los resultados mensualmente (ver Figura 3.12), se obtiene un comportamiento que concuerda con lo obtenido en el dominio 1. Todas las configuraciones reflejan los mayores acumulados en los meses del período lluvio influenciado por el paso de varios huracanes. Los menores errores los presenta la combinación W5-GF con mae = 3 y $mse \approx 120$ como valores máximos de estas medidas (Figura 3.13). También registró el mejor ajuste (Figura 3.14).

Revisando el resultado por horario, se observan marcadas diferencias con respecto al dominio 1. En este último se obtuvo un comportamiento consecuente con lo observado, es decir, los mayores acumulados en el horario de la tarde. Solo T-KF presentaba variaciones de un horario a otro no representativas de lo que realmente ocurrió. En el dominio 2 sin embargo, el mismo comportamiento lo presentan las configuraciones W5-KF y T-GF, sin mostrar relación lineal alguna con lo observado e índices de ajuste muy bajos. Lo anterior indica que al aumentar la resolución exceptuando W5-GF, el resto de los experimentos mostraron peores resultados que en el dominio 1, indicando que quizás estas configuraciones no son las mejores para resoluciones más altas. Por su parte W5-GF se mantiene como la combinación de parametrizaciones de mejor comportamiento (ver Figuras 3.15, 3.16, 3.17).

Si observamos los gráficos donde se muestra la distribución espacial de los acumulados de la precipitación (Figura 3.18), se comprueba la similitud con el dominio 1 con un ligero incremento en los valores y mejor localización. La mejor distribución espacial según lo observado lo presentan las configuraciones con Grell-Freitas como parametrización de cúmulos.

Finalmente teniendo en cuenta los resultados alcanzados con resolución de 27km y con 9km, atendiendo a los acumulados puntuales, las medidas de error y distribución espacial de la precipitación la mejor configuración es W5-GF (Conf1). Este resultado coincide con lo obtenido por Mitrani [32] en los estudios de sensibilidad realizados con el MM5V3. La poca diferencia entre los resultados con el dominio 1 y el dominio 2, pudiera sugerir que no es necesario aumentar la resolución. Estos resultados sin embargo, están basados en el enfoque celda-punto ya que no se contó con datos para realizar una evaluación espacial del

dominio. Estas estrategias espaciales son las que puedieran mostrar el valor agregado del aumento de la resolución.

3.2. Sensibilidad a la variación de las condiciones iniciales

Este experimento tuvo como objetivo evaluar si la inicialización del modelo WRF con datos pronóstico del modelo GFS tendría una mejoría con respecto a la inicialización con análisis de este modelo, o al menos si las diferencias entre sí no resultan significativas. El dato de análisis tiene mejor calidad pero los campos de las variables son muy suavizados y además no contienen información de los campos de precipitación ni de los movimientos verticales. El modelo durante los primeros plazos debe autoajustarse para reflejar adecuadamente estos procesos. Como consecuencia en el caso de las corridas con análisis se desprecian las primeras horas de pronóstico que son las de nuestro interés en este estudio. De ahí la propuesta de utilizar los datos de pronóstico del GFS. En este experimento se realizaron corridas con ambos tipo de inicialización tomando las ciclos de pronóstico del modelo GFS de las 0000, 0600,1200 y 1800 UTC. Se evaluaron las variables Temperatura, Presión Atmosférica en Superficie, Humedad Relativa, Fuerza del Viento y Precipitación mediante la estrategia celda-punto. Las figuras se encuentran en los Anexos.

Los resultados de la evaluación reflejaron muy pocas diferencias entre las corridas con pronóstico del GFS y las corridas con análisis del GFS. En muchos casos en dependencia del plazo de pronóstico se intercambiaron los momentos en que estos mantuvieron sus mejores resultados entre ambos tipos de inicialización. Se apreció un comportamiento irregular de los estadígrafos calculados donde en el caso de la precipitación para las corridas inicializadas con datos de pronóstico de GFS a las 1200 y a las 1800 UTC (ver Figura 3.22) se pudo comprobar una diferencia considerable en los errores absolutos para esta variable con respecto a las corridas de igual inicialización pero con datos de análisis. Estas diferencias mostraron que los errores absolutos más bajos fueron los de las corridas con datos de pronóstico. Ya en el caso de las corridas con los otros dos ciclos de inicialización de las 0000 y 0600 UTC (ver Figura 3.22) las diferencias fueron menos significativas. Analizando todas las corridas se pudo apreciar que la precipitación mostró sus errores máximos durante horarios de la tarde y principios de la noche, lo cual está relacionado con los horarios donde ocurre la mayor formación de nubosidad convectiva en el día.

En el caso de la fuerza del viento, se pudo observar que en la mayoría de los plazos de pronósticos los errores absolutos más bajos son los obtenidos con las corridas inicializadas con ficheros de pronósticos de GFS en todos los ciclos de inicialización (0000, 0600, 1200 y 1800 UTC) (ver Figura 3.19). Los mayores errores de esta variable fueron en los plazos de la noche y comienzo de la mañana. Por otra parte, en el caso de la humedad relativa sucede lo contrario, en todos los ciclos de inicialización los errores más altos fueron los de las corridas con pronóstico (ver Figura 3.20). Los valores más altos del error de la

humedad relativa se presentan en horas de la tarde. En el caso de la temperatura, excepto en el caso de las corridas inicializadas a las 1800 UTC (ver Figura 3.23), el cual muestra siempre errores de más altos en las corridas con pronósticos, el resto de las inicializaciones de las 0000, 0600 y 1200 UTC se observa que la inicialización con pronóstico muestra errores absolutos más bajos en las primeras 12 horas de pronóstico y también en los plazos que coinciden con horarios de la noche. Los errores más altos de esta última variable son en horarios de la tarde. Por otra parte la presión muestra muy pocas diferencias entre ambos tipos de inicialización, y se observa que los mayores errores en ambos casos es a principios de la noche y en horarios de la mañana.

También se pudo apreciar en los promedios por plazos de pronósticos de las variables analizadas para todos los casos de estudios, que estos reflejaron muy bien su relación con el ciclo diurno, aunque en el caso de algunas variables se mantuvo una sobreestimación del modelo con respecto a la observación como lo es el caso de las variables fuerza del viento (ver Figura 3.24), humedad relativa (ver Figura 3.25), y la precipitación (ver Figura 3.27). En el caso de la temperatura (ver Figura 3.28). Para la presión atmosférica en superficie (ver Figura 3.26), ocurrió lo contrario, el modelo subestimó los valores medios en todos los plazos de las corridas.

En el análisis del índice de la correlación de Pearson, se pudo apreciar, en el caso de la fuerza del viento, que las corridas realizadas con análisis de GFS mantuvieron un comportamiento más cercano al de las observaciones que el que se obtuvo con las corridas con pronóstico de GFS. Las mejores correlaciones se obtienen en horarios de la madrugada y principios de la mañana (ver Figura 3.29). La correlación en el caso de la humedad relativa (ver Figura 3.30), también fue más alta en las corridas con pronóstico de GFS y sus mayores valores de correlación fueron en horarios de la mañana. Igual comportamiento reflejó la temperatura (ver Figura 3.33), las corridas de mejor correlación fueron con datos de análisis de GFS. En el caso de esta última variable, los valores de correlación no muestran valores máximos asociados a horarios específicos del día, sino que estos valores máximos de mejor correlación se presentan entre las 6 y 12 horas de pronóstico para las inicializaciones de las 0000, 0600, 1200 y las 1800 UTC. La presión en superficie (ver Figura 3.31) muestra los mejores resultados de correlación en el caso de las corridas con análisis. Esta variable refleja 2 momentos en el día donde alcanza valores máximos de mejor correlación. Estos horarios son entorno a las horas de las 0600 y 1800 UTC. En la precipitación (ver Figura 3.32) se pudo observar que las primeras 3 horas de pronósticos de las corridas con los 4 ciclos de GFS se mantienen máximos de correlación que están vinculados a que en el modelo, el plazo inicial no cuenta con el campo de precipitación y además coincide en con que en la mayoría de las inicializaciones de estas corridas no se reportaron precipitaciones en las estaciones analizadas. Por otra parte las corridas con análisis de GFS mantuvieron mejores valores de correlación que las corridas con pronósticos de GFS.

3.3. Valor agregado de la asimilación de datos

En este epígrafe se analiza la mejoría o no, al inicializar el modelo con datos de análisis del GFS y datos de pronóstico del mismo en las 0000 UTC, más la asimilación de datos de estaciones y sondeos ubicados en los dominios simulados. Es importante señalar que el mayor aporte lo tienen los datos de sondeos los cuales brindan infomación en toda la columna mientras que los datos de estaciones solo mejorarían la representación de las diferentes variables meteoroloógicas en superficie. Los experimentos fueron realizados utilizando la configuración W5-GF y se utilizó el Error Absoluto Medio y el Coeficiente de Correlación de Pearson para el análisis de las variables Temperatura, Presión, Humedad Relativa, Fuerza del Viento y Precipitación.

Empezando por las variables más nobles, la temperatura y la presión, la Figura 3.9 muestra el mae y el pcor de las mismas para cada horario pronosticado. Las diferencias entre cada configuración no son significativas. La inicialización con análisis y asimilación presenta una ligera mejoría con respecto a la configuración en la que no se asimila, como es de esperar. La inicialización con pronóstico sin embargo, empeora con la inserción de los datos de estaciones y sondeos. En particular la Presión en esta configuración alcanza errores de 10 hPa en los primeros plazos de pronóstico. Ambas variables presentan una relación lineal con respecto a los observado.

El pronóstico de la fuerza del viento realizado por cada configuración, se comporta de igual manera que la temperatura y la presión con el peor resultado para la combinación pronóstico + asimilación que alcanza los mayores errores $(mas > 8,0 \ k/h)$ en los plazos iniciales, donde debe tener más influencia la asimilación. Para esta variable el mejor pronóstico lo alcazó la configuración pronóstico sin asimilación. La fuerza del viento como evidencia el gráfico de la correlación, aumenta cuando aumenta el valor observado por lo que se mantiene una relación lineal directa con las observaciones (ver Figura 3.10 (a y b)).

La humedad relativa por su parte, no muestra sensibilidad al proceso de asimilación de datos. No se obtiene mejoría alguna ni con análisis ni con pronóstico. Se puede observar en la Figura 3.10 (c y d) que todas las configuraciones se encuentran agrupadas en los mismos valores de error.

En cuanto a la precipitación (Figura 3.10 c yd), igualmente no se observa marcada diferencia entre cada configuración. Sin embargo, con respecto al resto de las variables, el experimento pronóstico + asimilación presenta los mejores resultados en las primeras 12 horas de pronóstico. Esto es de esperar ya que la inicialización con análisis no contempla la precipitación por lo que el modelo debe generarla en período de autoajuste mientras que en la inicialización con pronóstico incluye el dato de lluvia, disminuyendo el tiempo de autoajuste mejorando el pronóstico de tan compleja variable. No obstante en las siguientes horas de pronóstico se pierde la mejoría.

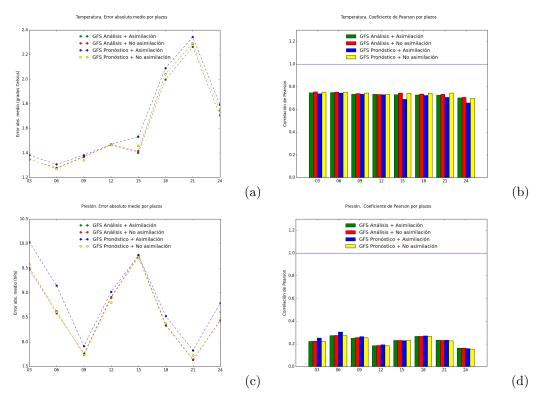


Figura 3.9: Temperatura: mae (a), pcor (b). Presión: mae (c), pcor (d)

En general no se puede concluir que la asimilación de los datos mejora el pronóstico. En la inicialización con análisis + asimilación el impacto de la asimilación fue mayor en las variables Temperatura y Presión. La lluvia sin embargo fue mejor pronosticada para las primeras 12 horas por la configuración pronóstico + asimilación. Este resultado es producto de que no fueron suficientes los sondeos y estaciones asimilados, por lo que el impacto de los mismos es imperceptible. Para obtener una mejoría significativa se debe contar con mayor densidad de datos en el área de asimilación. Esto se puede lograr incluyendo también la información de las boyas. Además revisando el módulo de control de calidad de los datos del WRFDA, se pueden relajar las reglas que desprecian las distintas observaciones dejando mayor cantidad para insertar en la inicialización. Por otro lado para tener mayor información en la vertical, se pueden incluir los sondeos de los satélites los cuales tienen el mayor impacto.

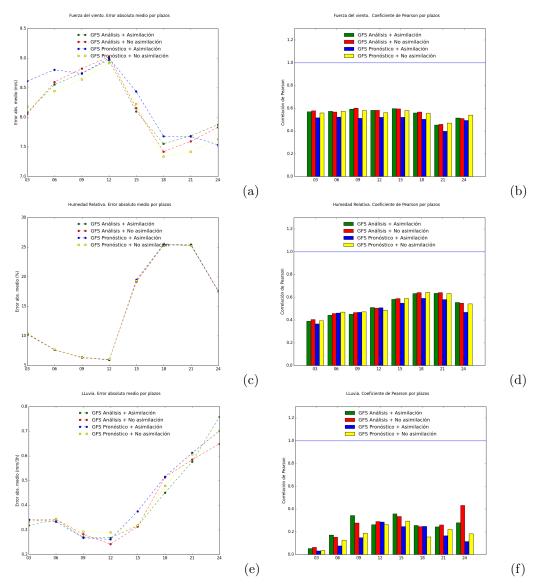


Figura 3.10: Fuerza del Viento: mae (a), pcor (b). Humedad Relativa: mae (c), pcor (d). Precipitación: mae (e), pcor (f)

Conclusiones

Luego de haber presentado y discutido lo resultados se arriba a las siguientes conclusiones:

- La configuración de microfísica y cúmulo que presentó los menores errores puntuales y representó mejor la lluvia desde el punto de vista espacial fue la Conf1: WSM5 y Grell-Freitas.
- En el caso de la inicialización con datos de pronóstico y análisis se comprobó que el primero no solo nos permite ganar en tiempo a la hora de presentar los resultados de las corridas del modelo, sino que también reduce el error cometido por el mismo en las primeras horas de pronóstico, especialmente con la variable lluvia. Esta mejoría resultó más significativa en las corridas inicializadas a las 1200 y 1800 UTC. Para el resto de las variables los distintos estadígrafos tuvieron un comportamiento similar en todos los experimentos realizados.
- La asimilación de datos de sondeos y estaciones en superficie no tuvo un impacto significativo en el comportamiento del modelo aunque, para la precipitación, se observó una ligera mejoría en las primeras 12 horas de pronóstico con la configuración que utiliza inicialización con pronóstico y la asimilación.

Recomendaciones

Aunque los resultados alcanzados en este trabajo constituyen un paso de avance importante, aún queda mucho por hacer sobre todo relacionado con la asimilación de datos. Por tanto se recomiendan las siguientes acciones para la continuación de esta investigación.

- Realizar comparaciones entre los métodos de asimilación de datos de observaciones meteorológicas implementados en los módulos ADAS (del modelo ARPS) y WRFDA (del modelo WRF).
- Realizar la asimilación de datos de satélites meteorológicos.
- Evaluar las parametrizaciones de capa fronteriza planetaria, radiación de onda corta y de onda larga, superficie del suelo, y capa superficial.
- Realizar experimentos variando el número y la distribución de los niveles verticales.
- Comenzar el diseño de un dominio de 3 km de resolución anidado a los dominios de simulación aquí discutidos.

Bibliografía

- [1] Acosta, A., 2008: Los tornados en Cuba. Análisis de algunas condiciones favorables para su desarrollo dentro del período lluvioso. Trabajo Diploma. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. La Habana, Cuba
- [2] Aguilar, G. G., L. Naranjo, M Carnesoltas, 2005: Informe de Resultado Científico. Establecimiento de condiciones de la circulación atmosférica a escala sinóptica en los alrededores de Cuba, favorables para la aparición de tormentas locales severas del proyecto "Condiciones sinópticas favorables para la ocurrencia de Tormentas Locales Severas en Cuba. Un esquema para su predicción". Instituto de Meteorología. 35 pp.
- [3] Aguilar, G. G., 2007: Condiciones a escala sinópticas para la ocurrencia de aeroavalanchas en Cuba. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Meteorológicas. Biblioteca del INSMET.
- [4] Alfonso, A. P., 1986: El brote de tiempo severo en Cuba del 8 de febrero de 1978. Descripción del brote y situación sinóptica. Ciencia de la Tierra y el Espacio, 10, 101-114.
- [5] Alfonso, A. P, 1988: Climatología de las tormentas locales severas de Cuba y fundamentos para su pronóstico. Tesis presentada en opción al grado científico de candidato a Doctor en Ciencias Geográficas, Matanzas. 174 pp.
- [6] Alfonso, A. P, L. Naranjo, M. Fernández, J. Bueno y J. López 1990: "Bajas Frías superiores y tormentas locales severas. Análisis del caso 29-30 de Julio de 1981". En Rev. Cuba. Met. Vol. 3 Num.1, 87-100.
- [7] Alfonso, A. P, 1994: Climatología de las tormentas locales severas de Cuba. Cronología. Editorial Academia, La Habana. 168 pp.
- [8] Ballester M., 2008: Resumen sinóptico mensual. Grupo de investigaciones del centro de pronóstico del Instituto de Meteorología, Disponible en: www.insmet.cu.

- [9] Bermúdez, Y., G. Aguilar, G. Acosta y A. Wall, 2009: Distribución Espacial de las Tormentas Locales Severas en Cuba. Programa Análisis y pronóstico del tiempo y del clima terrestre y especial, Informe Científico
- [10] Carnesoltas M., L. Naranjo, 2009: Condiciones a escala sinóptica favorables para la aparición de tormentas locales severas en Cuba. Período poco lluvioso. Revista Cubana de Meteorología. Vol. 15 No. 1, 87-108
- [11] Carnesoltas M., L. Naranjo, 2010: Condiciones sinópticas favorables para la aparición de tormentas locales severas en Cuba. Período lluvioso. Revista Cubana de Meteorología. Vol.16 No.1,13-31.
- [12] Camacho, N., 2013: Brotes de tiempo severo en las regiones central y oriental de Cuba. Análisis sinóptico y comportamiento de algunas variables a mesoescala. Trabajo Diploma. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. La Habana, Cuba
- [13] Concepción, M., 2014: Propuesta para una nueva versión del sistema experto Resolución Objetiva por Sistema de Experto de Tormentas (ROSET). Trabajo Diploma. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. La Habana, Cuba
- [14] Cruz, R.C., 2010: Asimilacón de observaciones de estaciones de superficie y torres de gradiente en el pronóstico numérico con el modelo de mesoescalar MM5V3. Trabajo Diploma. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. La Habana, Cuba
- [15] C. A. Davis, B. G. Brown, R. G. Bullock, and J. Halley Gotway. The Method for Object-based Diagnostic Evaluation (MODE) applied to WRF forecasts from the 2005 Spring Program. Wea. Forecasting, 24, pages 1252-1267, 2009.
- [16] De la Nuez, W. R., 2010: Ambientes favorables a mesoescala para la ocurrencia de aeroavalanchas en las provincias habaneras. Tesis presentada en opción al grado de Licenciado en Meteorología. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas, 65 pp.
- [17] Ebert EE. 2008. Fuzzy verification of high-resolution gridded forecasts: a review and proposed framework. Meteorol. Appl., 15, 51-64.
- [18] Figueroa, I., 1987: Patrones Sinópticos asociados a las Tormentas Severas que ocurren en las provincias habaneras en el período lluvioso durante el año 1987. Tesis en opción al grado de Licenciado en Geografía. Facultad de Geografía, Universidad de la Habana.
- [19] Ferrer, A., 2013: Simulación numérica de tornados en Cuba. Trabajo Diploma. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. La Habana, Cuba.

- [20] González, C. M., 2012: Comportamiento de algunas variables meteorológicas en el desarrollo del tiempo severo en la región occidental de Cuba. Trabajo Diploma. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. La Habana, Cuba
- [21] González C., González A. O., 2014: Resumen sinóptico mensual. Grupo de investigaciones del centro depronóstico del Instituto de Meteorología, Disponible en: www.insmet.cu.
- [22] Golding, B. W.,1995: Report on the second Nimrod trial. Met. Office FR-Div Tech. Rep. No. 178. Unpublished report available from the National Meteorological Library, London Road, Bracknell, Berks RG12 2SZ, UK.
- [23] Grell GA, SR Freitas. 2013. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling. Atmos. Chem. Phys. Discuss., 13, 23845-23893.
- [24] Hernández, R., 2013: Asimilación de observaciones meteorológicas con el modelo físico matemático ARPS. Trabajo Diploma. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. La Habana, Cuba
- [25] Kain, JS. 2004. The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. J. Appl. Meteor., 43, 170-181.
- [26] Kalnay, E. (2003). Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- [27] Lecha, L. B., L. R. Paz y B. Lapinel [editores] (1994): El Clima de Cuba. Editorial Academia, La Habana, 186 p.
- [28] Li, P.W. & Edwin S.T. Lai, 2004: Applications of Radar-based Nowcasting Techniques for Mesoscale Weather Forecasting in Hong Kong, Meteorological Applications, 11, pp 253-264
- [29] Mesoscale & Microscale Meteorology Division. 2014. ARW Version 3 Modeling System User's Guide. Complementary to the ARW Tech Note, 411pp. NCAR: Boulder, Colorado, USA. Web: http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/ARWUsersGuideV3.pdf
- [30] MET Developers. The MODE Tool. Model Evaluation Tools Version 3.0.1 (METv3.0.1). User's Guide 3.0.3. Developmental Testbed Center. pages 98-122. 2011
- [31] Mitrani I., L. Alvarez, I. Borrajero. Aplicación optimizada del MM5V3 sobre el territorio cubano mediante el uso de una computadora personal. Revista Cubana de Meteorología, 2003.
- [32] Mitrani I., C. González, I. Borrajero. El uso de MM5V3 en la predicción de eventos peligrosos sobre el territorio cubano. Memorias del Taller de Meteorología Tropical, TROPICO-2004, La Habana (publicación en soporte técnico), ISBN:959-7167-02-6., 2004.

- [33] Mitrani I., C. González. Predicción de trayectoria de huracanes en la temporada del 2002 mediante un modelo de área limitada, a su paso por territorio cubano. Memorias del IV Congreso Nacional de Geografía, La Habana-2004 (publicación en soporte técnico), 2004.
- [34] Molina, E., 2014: Condiciones a escala sinóptica y mesoescala que favorecen las aeroavalanchas en la región occidental de Cuba. Trabajo Diploma. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. La Habana, Cuba.
- [35] Morrison H, Thompson G, Tatarskii V. 2009. Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two-moment schemes. Mon. Wea. Rev., 137, 991-1007.
- [36] NCEP Production Suite Review 3-5 December 2013
- [37] Novo, S., D. Martínez y F. Gamboa, 2004: Estudio por radar de dos Tormentas Locales Severas observadas sobre CamagÃ¹/₄ey, Cuba. Revista Cubana de Meteorología Vol.10. No.2, 40pp.
- [38] Novo, S., 2008: Pronóstico inmediato de tormentas convectivas por radar una actualización. Revista Brasileira de Meteorología, v.23, n.1, 41-50.
- [39] Pozo, D., L. Alfonso, y J. Marín, 1999: Simulación numérica bidimensional de nubes convectivas. 6-1999, Boletín de la Sociedad Meteorológica de Cuba.
- [40] Pozo, D., D. Martínez, y M. Chacón, 2001. Simulación numérica tridimensional de una celda convectiva simple en condiciones tropicales utilizando el modelo ARPS. Rev. Cub. Meteor., 8, 1, 74-82.
- [41] Pozo, D., 2003: Simulación numérica de la formación y evolución de sistemas nubosos convectivos de mesoescala sobre Camagý ey con ayuda de un modelo tridimensional. Centro de Física de la Atmósfera del Instituto de Meteorología, Cuba. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Meteorológicas.
- [42] Rivero, R. y J. C. Antuña 1981: Climatología sinóptica de las tormentas locales severas de Cuba, Bol. Cient-Tec.,6:1-9.
- [43] Rabelo, D., 2012: Procedimiento para la estimación de la velocidad de la racha máxima de una aeroavalancha. Tesis presentada en opción al grado de Licenciado en Meteorología. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas.53 pp.
- [44] Roque, A., 2013: Método de Evaluación Diagnóstico Orientado a Objetos Modificado (MODEMod) utilizando la información de los satélites meteorológicos. Trabajo de Diploma. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas

- [45] Rodríguez, C.F. 2014:, Modificación e implementación del método de evaluación espacial MODEMod para su uso operativo en Cuba. Trabajo de Diploma. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas
- [46] Srivastava, K., Jidong Gao, Keith Brewster, S. K. Roy Bhowmik, Ming Xue and Ranu Gadi, 2010: Assimilation of Indian radar data with ADAS and 3DVAR techniques for simulation of a small-scale tropical cyclone using ARPS model, Natural Hazards, 58, 15-29.
- [47] Thompson G, Field PR, Rasmussen RM, Hall WD. 2008. Explicit Forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization. Mon. Wea. Rev., 136, 5095-5115.
- [48] Varela, A., 2010: Entornos favorables para el desarrollo de los tornados en las provincias occidentales de Cuba. Trabajo Diploma. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. La Habana, Cuba.
- [49] Warner TT. 2011. Numerical Weather and Climate Prediction. Cambridge University Press, Cambridge, pp 52-58.
- [50] Xue, M., Droegemeier, K. K., Wong, V., Shapiro, A., and Brewster, K., 1995: "ARPS Version 4.0 user's guide." Center for Analysis and Prediction of Storms, Univ. of Oklahoma, 380 pp.[Available from CAPS, 100 E. Boyd St., Norman, OK 73019.]
- [51] http://www.tdr.cesca.es/TESISU P C/AV AILABLE/...//07Ojc07de12.pdf
- [52] ftp://tgftp.nws.noaa.gov/data/observations/metar/decoded
- [53] http://weather.uwyo.edu.
- $[54] \ http://daac.gsfc.nasa.gov/precipitation/TRMM_README/TRMM_3B42_readme.shtml$

Anexos

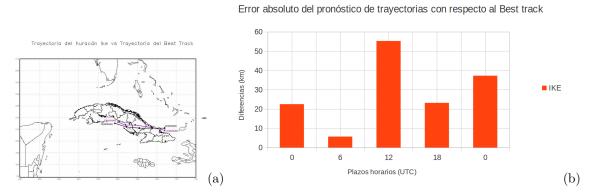


Figura 3.11: Trayectoria de Ike según Conf1 (violeta) y Best Track (negro) (a). Diferencias entre las trayectorias (b)

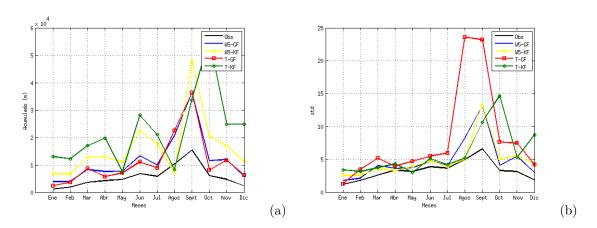


Figura 3.12: Acumulado mensual (a), Desviación estándar (b). Dominio 2

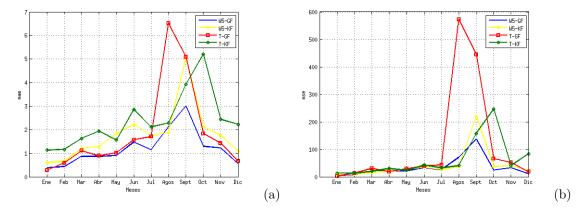


Figura 3.13: Error Absoluto Medio (a), Error Cuadrático Medio (b). Dominio 2

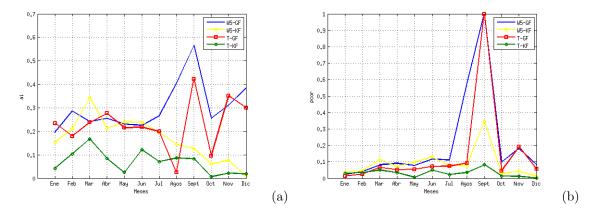


Figura 3.14: Índice de Ajuste (a), Correlación de Pearson (b). Dominio 2

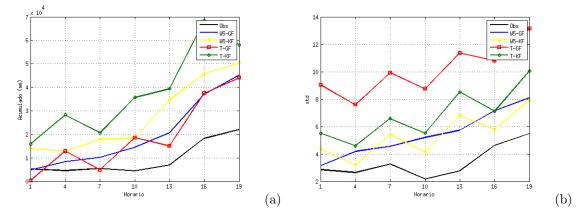


Figura 3.15: Acumulado horario (a), Desviación estándar (b). Dominio 2

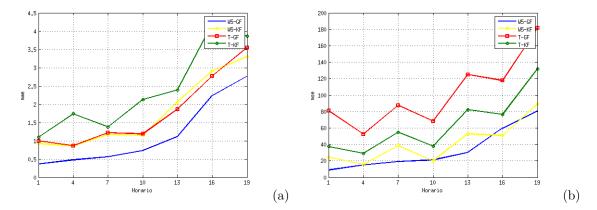


Figura 3.16: Error Absoluto Medio (a), Error Cuadrático Medio (b). Dominio $2\,$

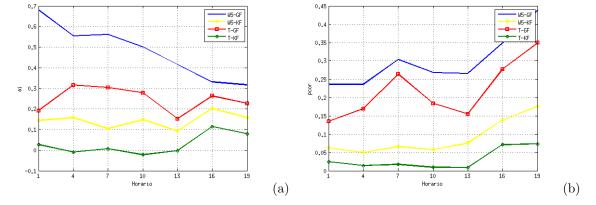


Figura 3.17: Índice de Ajuste (a), Correlación de Pearson (b). Dominio 2

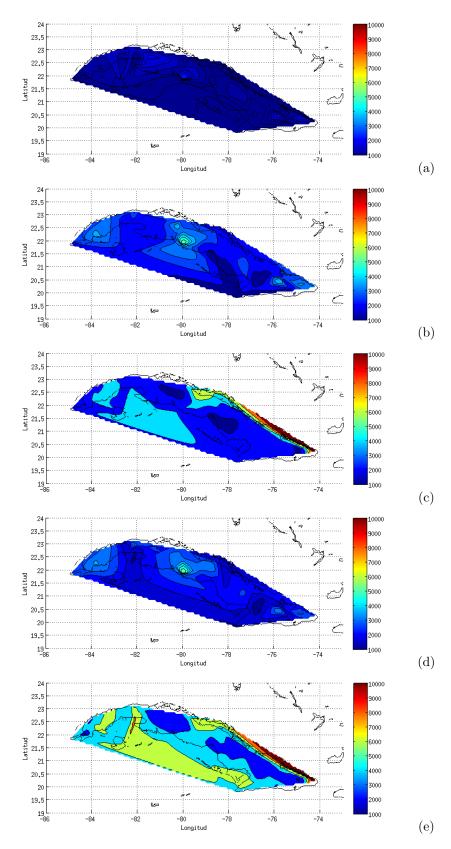


Figura 3.18: Acumulado (mm). Observación (a), W5-GF (b), W5-KF (c), T-GF (d), T-KF (e). Dominio $2\,$

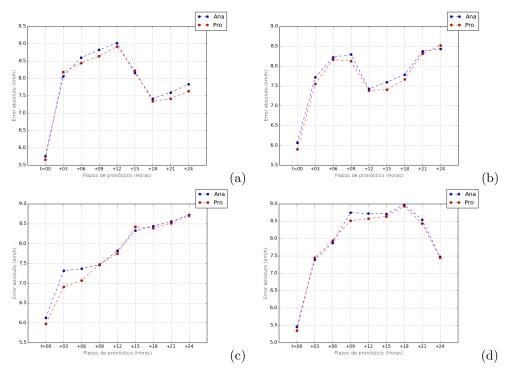


Figura 3.19: Error absoluto medio de la fuerza del viento: 0000 (a), 0600 (b), 1200 (c) y 1800 (d) UTC

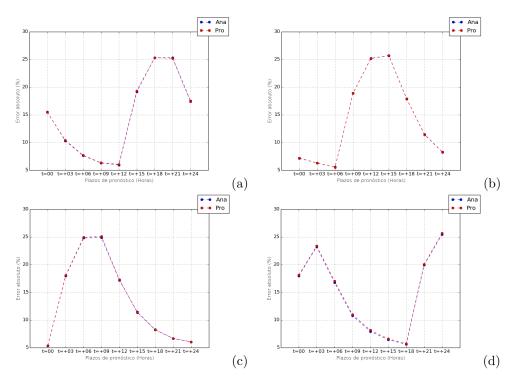


Figura 3.20: Error absoluto medio de la humedad relativa: 0000 (a), 0600 (b), 1200 (c) y 1800 (d) UTC

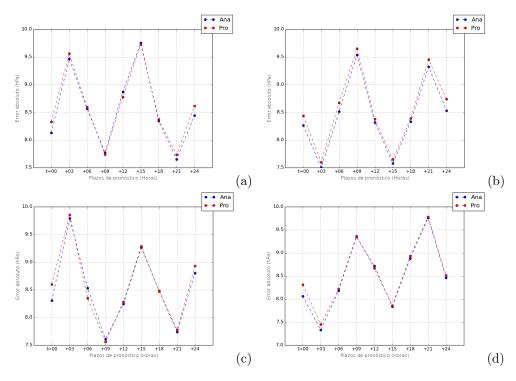


Figura 3.21: Error absoluto medio de la presión en superficie: 0000 (a), 0600 (b), 1200 (c) y 1800 (d) UTC

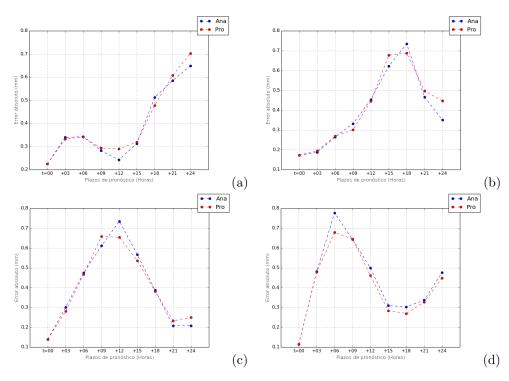


Figura 3.22: Error absoluto medio del acumulado de precipitación: 0000 (a), 0600 (b), 1200 (c) y 1800 (d) UTC

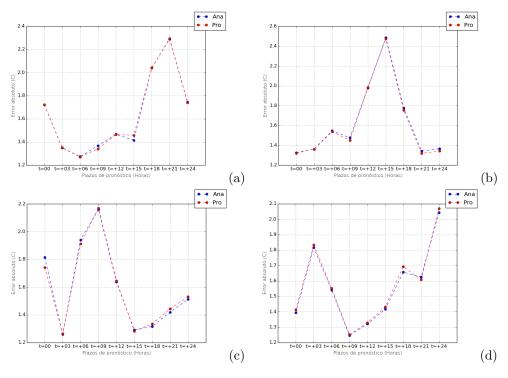


Figura 3.23: Error absoluto medio de la temperatura: 0000 (a), 0600 (b), 1200 (c) y 1800 (d) UTC

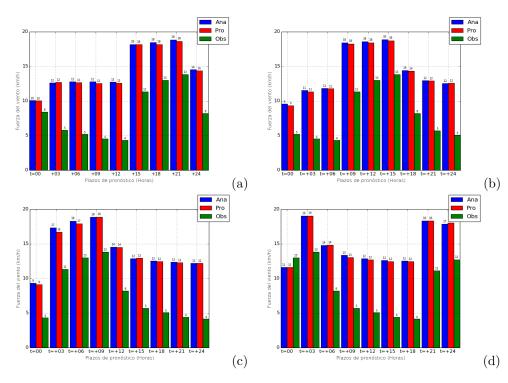


Figura 3.24: Análisis del promedio de la fuerza del viento: 0000 (a), 0600 (b), 1200 (c) y 1800 (d) UTC

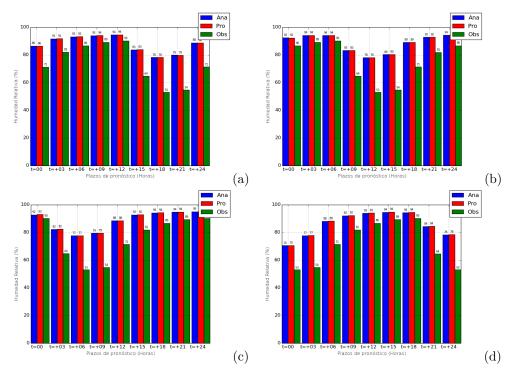


Figura 3.25: Análisis del promedio de la humedad relativa: 0000 (a), 0600 (b), 1200 (c) y 1800 (d) UTC

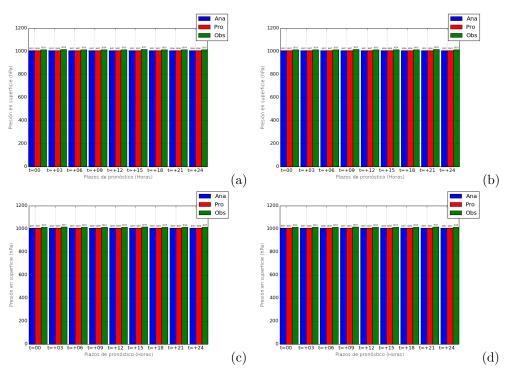


Figura 3.26: Análisis del promedio de la presión en superficie: 0000 (a), 0600 (b), 1200 (c) y 1800 (d) UTC

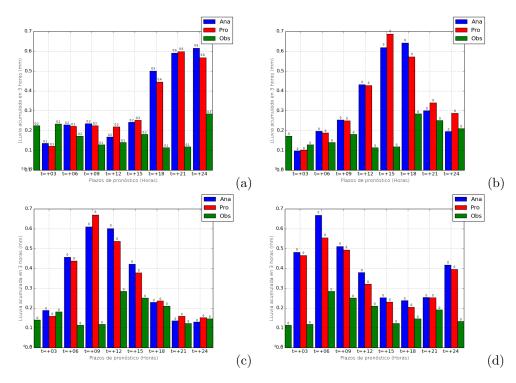


Figura 3.27: Análisis del promedio del acumulado de precipitación: 0000 (a), 0600 (b), 1200 (c) y 1800 (d) UTC

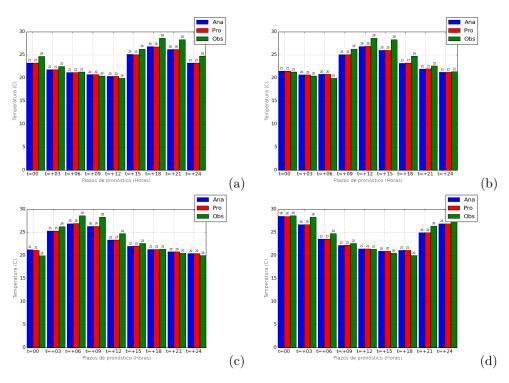


Figura 3.28: Análisis del promedio de la temperatura: 0000 (a), 0600 (b), 1200 (c) y 1800 (d) UTC

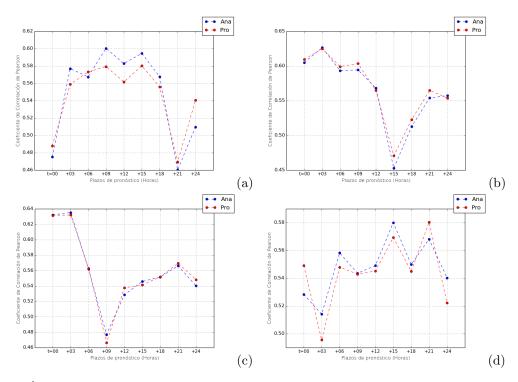


Figura 3.29: Índice Correlación de Pearson de la fuerza del viento: 0000 (a), 0600 (b), 1200 (c) y 1800 (d) UTC

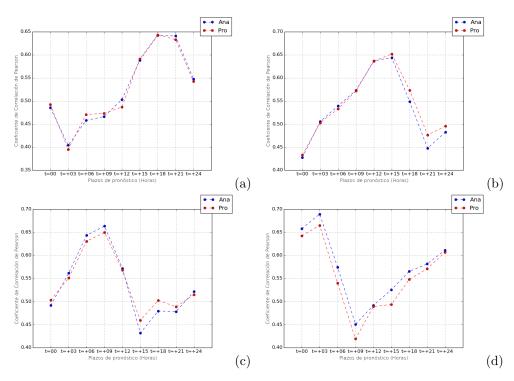


Figura 3.30: Índice Correlación de Pearson de la humedad relativa: 0000 (a), 0600 (b), 1200 (c) y 1800 (d) UTC

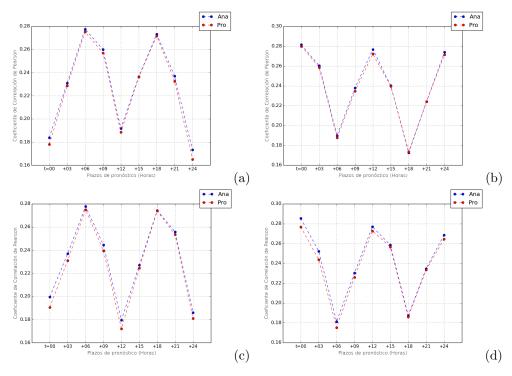


Figura 3.31: Índice Correlación de Pearson de la presión en superficie: 0000 (a), 0600 (b), 1200 (c) y 1800 (d) UTC

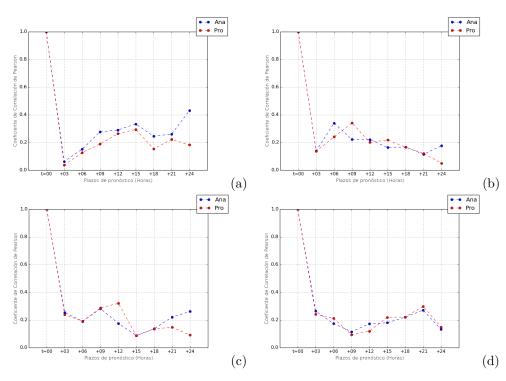


Figura 3.32: Índice Correlación de Pearson del acumulado de precipitación: 0000 (a), 0600 (b), 1200 (c) y 1800 (d) UTC

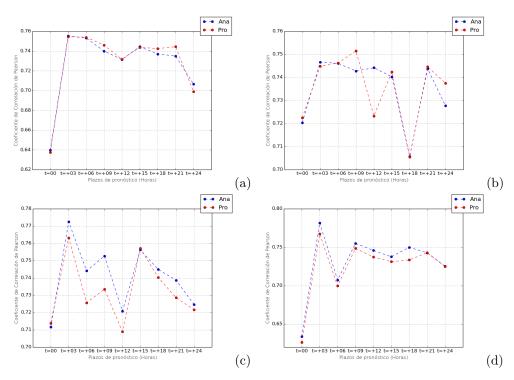


Figura 3.33: Índice Correlación de Pearson de la temperatura: 0000 (a), 0600 (b), 1200 (c) y 1800 (d) UTC