

ESTUDIO PRELIMINAR PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA ASIMILACIÓN DE DATOS DE RADARES Y SATÉLITES METEOROLÓGICOS EN PRONÓSTICOS NUMÉRICOS A MUY ALTA RESOLUCIÓN SOBRE LA REGIÓN OCCIDENTAL DE CUBA

Adrián Luis Ferrer Hernández⁽¹⁾, *Israel Borrajero Montejo*⁽¹⁾.

⁽¹⁾Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, Casablanca, Regla, La Habana, Cuba, {adrian.ferrer, israel.borrajero}@insmet.cu

Resumen

En el trabajo se realiza un estudio sobre algunos aspectos necesarios para la implementación operativa de la asimilación de datos de radar y satélites meteorológicos, en simulaciones con el modelo WRF a muy alta resolución espacial dentro del sistema de predicción numérica SisPI. En los experimentos para la asimilación de observaciones de radar se utiliza el método variacional 3DVAR y se tomó el área de estudio de las provincias occidentales de Cuba de Habana-Artemisa-Mayabeque en un dominio de 1km de resolución espacial. Sobre esta área coincide la cobertura de dos tipos de radares y se estudian las diferencias en la inicialización considerando las mediciones de cada radar para 1 caso de estudio. Se realizan además pruebas de sensibilidad de parámetros en las opciones del módulo de asimilación de datos WRFDA, relacionados estos con el tratamiento de las observaciones, comparando sus resultados con las observaciones de la red de estaciones meteorológicas del INSMET. Además, se compara las simulaciones sin asimilación de datos, con asimilación de solo datos PreBufr del sistema GDAS y con asimilación de estos datos adicionando el dato de radar. Para los datos en formato NEXRAD Level II del radar de Key West, Florida (NOAA) y del radar de Casablanca (INSMET), La Habana, fue necesario desarrollar un convertidor al formato FM-128 requerido por el WRFDA. También se hace una evaluación de las fuentes de datos disponibles en internet y en el INSMET para su factibilidad en la implementación operativa de la asimilación de datos en el SisPI. Por otro lado, en el caso de la asimilación de observaciones del satélite GOES-16, se estudian todos los avances a nivel internacional en la asimilación de observaciones provenientes de satélites geoestacionarios, y se propone un primer experimento dirigido a implementar este tipo de asimilación en la inicialización del sistema SisPI.

Palabras claves: Asimilación de datos, Radar, Satélite, WRFDA, GSI.

Abstract: In the work a study is carried out on some aspects necessary for the operational implementation of the assimilation of radar and meteorological satellites data, in simulations with the WRF model at very high spatial resolution within the SisPI numerical prediction system. In the experiments for the assimilation of radar observations, the 3DVAR variational method was used and the study area of the western of Cuba. The domain area covers the provinces of Habana-Artemisa-Mayabeque, it was taken in a 1km domain of spatial resolution. Over this area, the coverage of two types of radars coincides and the differences in initialization are studied considering the measurements of each radar for 1 case study. Parameter sensitivity tests are also performed in the WRFDA data assimilation module options, related to the treatment of the observations, comparing their results with the observations of the INSMET weather station network. Simulations are also compared without data assimilation, with assimilation of only PreBufr data from the GDAS system and with assimilation of these data by adding the radar data. For the data in NEXRAD Level II format of the radar of Key West, Florida (NOAA) and of the radar of Casablanca (INSMET), Havana, it was necessary to develop a converter to the FM-128 format required by the WRFDA. An evaluation is also made of the data sources available on the internet and in the INSMET for their feasibility in the operational implementation of data assimilation in the SisPI. On the other hand, in the case of the assimilation of observations of the GOES-16 satellite, all the advances at international level in the assimilation of observations from geostationary satellites are studied, and a first experiment is proposed to implement this type of assimilation in the SisPI system initialization.

Keywords: Data assimilation, Radar, Satellite, WRFDA, GSI.

1. Introducción.

La asimilación de datos es un proceso en el cual las observaciones meteorológicas se incorporan a un modelo numérico con el fin de modificar sus condiciones iniciales y aproximarse mejor al “verdadero” estado de la atmósfera (Aguilera, D., 2015). La integración de estos datos pasa por un proceso de control de calidad mediante técnicas variacionales y análisis estadístico. Durante la asimilación de datos se integran diferentes observaciones como radiosondeos, radares, estaciones meteorológicas automáticas, satélites, entre otras.

En la actualidad, los métodos de asimilación de datos más avanzados en la modelación numérica del tiempo son los Variacionales en 3 o 4 Dimensiones (3DVAR o 4DVAR), o métodos híbridos que combinan Filtros de Kalman por Conjuntos (EnKF por sus siglas en inglés) con los métodos variacionales, los cuales se encuentran implementados de forma operativa en múltiples modelos globales o regionales de las principales Agencias y Servicios Meteorológicos Nacionales. Algunos de estos métodos ya se encuentran implementados en los módulos WRFDA, GSI, ADAS y DART, los cuales son compatibles con el modelo WRF.

Las principales referencias que han marcado el desarrollo del WRFDA (módulo de asimilación de datos del modelo WRF) en la asimilación de datos de radar son los trabajos de Xiao et al. (2005) con la implementación de la asimilación de datos de velocidad radial, luego Xiao et al. (2007) incorpora la asimilación de datos de reflectividad, Xiao et al. (2008) lo implementa de forma operativa en la Agencia de Meteorología de Corea del Sur.

A partir de la versión 3.7, WRFDA tiene nuevas opciones en la asimilación de datos de radar: Actualmente dispone de dos metodologías diferentes para asimilar los datos de reflectividad del radar. El primero (use_radar_rf) asimila directamente la reflectividad observada utilizando un operador de reflectividad para convertir la razón de mezcla de agua de líquida del modelo en reflectividad y tomar la razón de mezcla total como la variable de control, como se describe por Xiao y Sun, 2007; Esta era la única opción disponible en versiones anteriores de WRFDA. Para esta opción, se puede activar la partición hidrometeor (hydrometeor partition) utilizando un esquema de microfísica de lluvia cálida descrito en la referencia anterior (use_3dvar_phy = .true.). El segundo (use_radar_rhv) es un esquema descrito en Wang et al, 2013, que asimila la proporción de mezcla de agua de lluvia que se estima a partir de Reflectividad del radar, descrita como un "método indirecto" en el artículo. Esta segunda opción también incluye una opción (use_radar_rqv) que permite la asimilación de la humedad en la nube estimada a partir de la reflectividad utilizando un método descrito en Wang et al, 2013. También incluye la asimilación de nieve y graupel convertidos a partir de la reflectividad usando fórmulas como se describe en Gao y Stensrud, (2012).

El tema de la asimilación de datos de satélites geoestacionarios en modelos numéricos de área limitada está actualmente en pleno desarrollo, y hay diversos enfoques al respecto. En Kurzrock et. al. 2018 se presenta un resumen amplio de la actualidad del tema y su avance en las distintas variantes, que pueden agruparse de manera general en:

- 1- Asimilación directa de irradiancias para zonas con cielo despejado
- 2- Asimilación directa de irradiancias para todo el dominio
- 3- Asimilación de propiedades físicas de nubes

En el primer caso se utiliza un modelo de transferencia radiativa para generar estimados de las temperaturas de brillo que vería el satélite en distintas longitudes de onda (infrarrojas) según la distribución de valores en la matriz del modelo. Las diferencias entre estos estimados y los valores en las imágenes reales constituyen los incrementos o innovaciones que se aplican en el algoritmo de cálculo del análisis o campo estimado del método 3D. En Zou et al (2011), Qin et al. (2013), Yang et al. (2017) y Qin y Zou (2018) se reportan mejoras en la inicialización, tanto para zonas despejadas como cubiertas. En los dos primeros casos y en Qin y Zou (2018) se usa el sistema de asimilación GSI (Wu et al. 2002) junto con el modelo de transferencia radiativa CRTM. En el caso Yang et al (2017) se utiliza una forma de análisis por conjuntos combinado con asimilación 3D.

En el segundo caso, se toman específicamente en cuenta las diferencias entre la contribución radiativa de las zonas nubladas y las despejadas. En Zhang et al. (2016) se utiliza un análisis por conjuntos para determinar correlaciones entre la temperatura de brillo en diferentes canales y distintas variables del

modelo, como la presión en superficie y la convección, este estudio se hace específicamente para huracanes. En el caso 3 se trata de inferir parámetros atmosféricos a partir de las imágenes, principalmente alturas y temperaturas de los topes de las nubes, así como fracción de nubes o cobertura nubosa. En White et. al. 2018 se presenta un método de corrección de la nubosidad a partir de discrepancias entre la nubosidad generada por el modelo y la detectada por el satélite, se aplica una modificación de la velocidad vertical del viento para favorecer o reducir, según sea necesario, la generación de nubes. Este trabajo no utiliza ni el sistema de asimilación de datos del modelo WRF (WRFDA), ni el GSI, sino que introduce las modificaciones directamente, como "nudging" a las ecuaciones del modelo atmosférico.

La totalidad de los trabajos revisados se refieren a experimentos puntuales y estudios de casos, no hay, de momento, referencias de aplicación operacional de métodos de asimilación de imágenes de satélites geoestacionarios. o de evaluaciones con series largas de datos. Por otra parte, en casos como Yang et al. (2017) y Zhang et al. (2016), se utilizan ensembles que requieren de importantes recursos computacionales. Los trabajos Zou et al (2011), White et al (2018) y Qin y Zou (2018), son los más sencillos en cuanto a su concepción, y sobre todo con respecto a los recursos computacionales necesarios en particular Zou et al (2011), su implementación resulta la más factible como primer paso en el desarrollo de un sistema de pronóstico operativo que incorpore la asimilación de datos de satélites geoestacionarios.

En Cuba se han desarrollado varios estudios para verificar los pronósticos numéricos con técnicas de asimilación de datos de observaciones meteorológicas. Cruz (2010) empleó el módulo Little R del modelo MM5V5 (Fifth Generation Mesoscale Model Version 3) para asimilar datos de las estaciones meteorológicas cubanas. Posteriormente Hernández (2013) utilizó el módulo ADAS del modelo ARPS para asimilar las estaciones cubanas y el radar doppler de Cayo Hueso, Florida en formato NEXRAD Level II. Con estos estudios se pudo comprobar que el empleo de las técnicas de asimilación de datos tiene un impacto positivo sobre el 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.

Posteriormente Sierra et al. 2014 durante el desarrollo de un sistema conocido como SisPI (Sistema de Pronóstico Inmediato), utilizó el módulo WRFDA para asimilar datos de estaciones meteorológicas y sondeos aerológicos. Este sistema fue diseñado para el pronóstico a corto plazo de alta resolución espacial, basándose en el uso del modelo atmosférico WRF y técnicas de asimilación de datos de observaciones meteorológicas. Seguidamente Armas (2015) utiliza asimilación de datos con WRFDA para 2 casos de estudios, para lo cual utiliza datos provenientes del sistema GDAS en formato PreBuf, el cual contiene información de estaciones meteorológicas (METAR y Sinópticas), boyas, barcos, sondeos, aviación, etc. También durante este trabajo se realizan pruebas donde se asimilan además datos de satélites de órbita polar, midiendo así el impacto de la asimilación de este tipo de observación en el pronóstico numérico.

Por estos motivos y debido a la gran demanda que tienen los pronósticos a corto plazo, el Instituto de Meteorología de Cuba está llevando a cabo numerosas investigaciones encaminadas a mejorar este tipo de predicción. Una de las herramientas que se está desarrollando para estos propósitos es el Sistema de Pronóstico Inmediato (SisPI) creado por el Centro de Física de la Atmósfera, basado en modelos numéricos de alta resolución espacial. Este sistema aún no cuenta con un sistema de asimilación de datos que incorpore las observaciones de la red de radares meteorológicos cubanos, satélites geoestacionarios, observaciones de las estaciones sinápticas y otros tipos de mediciones que pueden mejorar la precisión de los pronósticos.

De ahí que el **Objetivo general**: Estudiar diferentes metodologías para la implementación de la asimilación de datos de radares y satélites meteorológicos en pronósticos numéricos a muy alta resolución espacial.

Objetivos específicos:

1. Realizar experimentos dirigidos al uso de la asimilación de datos de radar para mejorar la inicialización de los modelos de pronóstico.
2. Desarrollar una propuesta para el funcionamiento operativo de la asimilación de datos de radar y evaluar el uso de diferentes fuentes de otros tipos de observaciones.
3. Preparar una propuesta de experimento para la implementación de la asimilación de datos del satélite GOES-16.

2. Materiales y métodos.

Modelo WRF y el módulo WRFDA.

El modelo de pronóstico numérico WRF (Weather Research and Forecast) ha sido desarrollado por la división de Meteorología de Microescala y Mesoescala de la NCAR (MMM Division, 2014). Este sistema de modelación tiene dos núcleos dinámicos, el NNM (Non-hydrostatic Mesoscale Model) y el ARW (Advanced Research WRF). Este último será el utilizado en esta investigación, ya que el núcleo NNM fue diseñado solo para la predicción del tiempo. Según sus desarrolladores, es posible su aplicación en un amplio espectro de escalas espaciales que van desde metros a miles de kilómetros.

La asimilación de datos es posible en el WRF mediante el módulo WRFDA. El WRFDA permite la asimilación mediante los enfoques 3D-VAR, 4D-VAR, ETKF y una variante híbrida que combina la asimilación variacional en 3 dimensiones con predicción por conjuntos. 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 (MMM Division, 2017).

El WRFDA, permite la inclusión de datos de observaciones convencionales en formato ASCII mediante la herramienta OBSPROC y en formato BUFR mediante datos PREPBUFR. Los datos de satélite son asimilados en formato BUFR (Binary Universal Form for the Representation of meteorological data) y en el caso de los radares se puede insertar el dato de reflectividad y velocidad radial en formato ASCII (MMM, 2017).

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 WRFDA. En el caso de la asimilación de datos de radar el WRFDA requiere que estos datos de entrada estén en un formato conocido como FM-128, el cual es un fichero ASCII codificado. El software recomendado en el manual para obtener este formato es el VDRAS (Chang et al., 2016), el cual requiere de una licencia para su uso. Por este motivo fue necesario desarrollar un convertidor mediante la biblioteca de PYTHON PyART para llevar los datos del radar doppler WSR-88D de Key West y del radar convencional MRL-5 modificado de Casablanca (ambos en formato NEXRAD Level II) a FM-128, mediante el cual se incorpora además un proceso de control de calidad.

2.2. Diseño de los experimentos y datos utilizados.

Para la realización de los experimentos de este trabajo se tomaron los datos del modelo GFS de 55 km de resolución espacial y temporal de 3 horas (disponibles en formato Grib2 en el archivo de datos históricos del Sitio Web en <http://nomads.ncdc.noaa.gov> del National Climate Data Center de la NOAA, Estados Unidos) para inicializar las corridas realizadas con el modelo WRF-ARW (versión 3.8.1). Las configuraciones utilizadas son tomadas de Sierra et al., 2014, donde se determinó la configuración actual de dominios (ver Figura No.4) y Parametrizaciones físicas del Sistema de Pronóstico Inmediato (SisPI) desarrollado en el Centro de Física de la Atmósfera del Instituto de Meteorología de Cuba. En el caso del dominio de 1km que se toma para este trabajo, se introduce dentro del dominio de 3km desarrollado por Sierra et. al. 2014, comprendiendo el área de las provincias occidentales de Cuba de Habana, Artemisa y Mayabeque.

Para el proceso de verificación y también de asimilación de datos se emplearon las estaciones meteorológicas disponibles en el área de estudio del dominio 4 de 1 km de resolución espacial (ver Figura No.5). En el caso de la asimilación de estos datos, fue necesario utilizar un convertidor de CSV a Little-R, siendo este último uno de los 2 formatos que soporta el WRFDA, el cual además puede cargar datos en el formato binario BUFR. El convertidor de formato fue implementado en C++ por Cruz (2010), quien lo utilizó para asimilar datos puntuales de observaciones en el modelo MM5 sobre el área de Cuba. En el caso de este trabajo solo fue necesario crear una interfaz en Python para manejar el flujo del procesamiento de estos datos. Finalmente, con estos datos y los datos de radar se realizan múltiples experimentos en los que se van cambiando parámetros de la configuración del WRFDA (se explica más adelante en la Tabla No.2), para estudiar la sensibilidad de estos y su influencia en la inicialización y el pronóstico del modelo WRF. En este trabajo se utilizó solo 1 caso de estudio, correspondiente al día 5-6 de diciembre de 2018. Durante

este día se encontraba arribando al occidente de Cuba una línea de nublados asociados a un frente frío débil. Las imágenes de radar de las 1200 UTC del día 5 de diciembre muestran una línea de tormentas de moderado desarrollo vertical que ya se encuentra próxima a la costa norte de Artemisa (ver Figura No.6). Luego al final de la mañana y primeras horas de la tarde el frente frío se desplaza sobre la región de estudio, avanzando en su movimiento al Este, quedando el área de interés con poca nubosidad. Luego el día 6 de diciembre de 2018, el frente retrocede y se mantiene casi estacionario sobre el estrecho de la Florida.

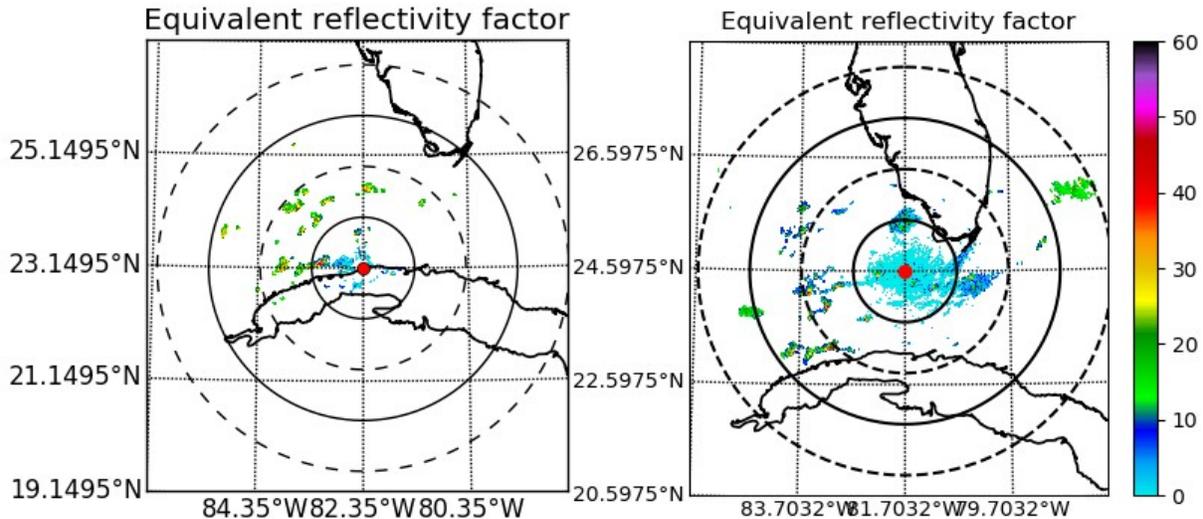


Figura No.6: Imágenes de radar de las 1200 UTC del día 5 de diciembre de 2018, creadas a partir del ángulo de elevación más bajo de los radares de Casablanca (izquierda) y Key West (derecha). Para la verificación presentada de las simulaciones del modelo WRF y el análisis de los errores pronosticados, se empleó el estadígrafo sesgo (BIAS) y el error medio absoluto (MAE) (López, 2015 y Díaz, 2010). Estos índices permiten medir el promedio del grado de correspondencia entre pares individuales de valores pronosticados y valores observados. Todos los cálculos realizados, así como también gráficos y mapas que se generaron, fueron implementados en el lenguaje de programación PYTHON, con el cual se crearon todos los scripts que utilizaron en este trabajo.

3. Discusión de los Resultados.

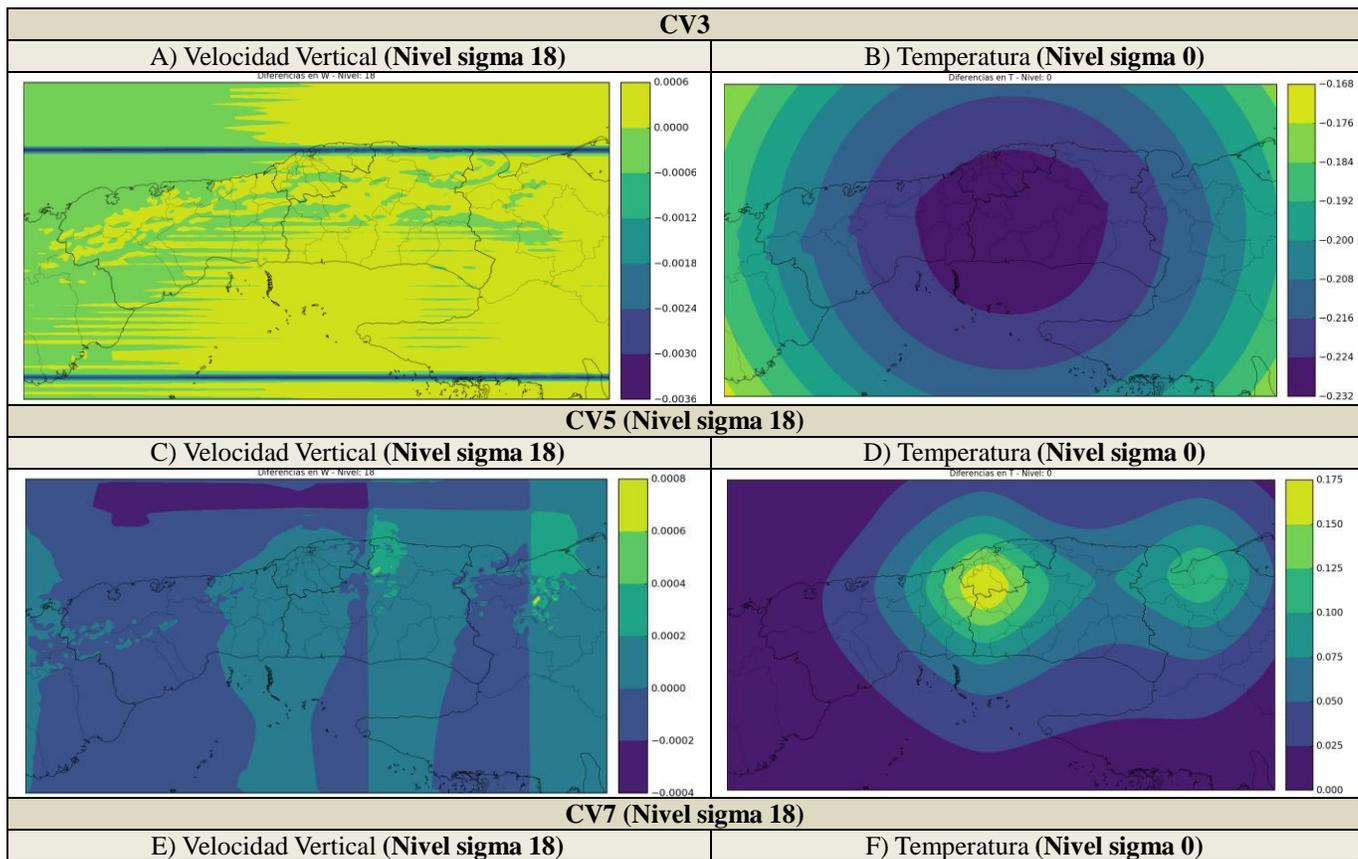
3.1 Asimilación de datos de radares meteorológicos.

3.1.1 Calibración de las matrices de covarianza (be.dat).

Las matrices de covarianza B recogen la información estadística de la dispersión o varianza de los campos iniciales, es decir, cómo difieren estos campos de sus valores “verdaderos”. Como los valores verdaderos de los campos no se pueden determinar en la práctica, se usan principalmente 2 métodos para estimar las varianzas, el denominado “NMC method” (National Meteorological Centre method) (Parrish and Derber, 1992) utiliza la diferencia entre pronósticos hechos con diferentes plazos de antelación para un conjunto de campos iniciales. El otro método es más sencillo conceptualmente pero más costoso de implementar y consiste en calcular la dispersión entre los miembros de un ensemble y la media del mismo. Como las diferentes variables tienen magnitudes numéricas, también es necesario establecer un balance entre las mismas, esta información también se incorpora a la matriz B (Hu et al, 2015).

Para un caso hipotético de un campo inicial de 2 variables con un dominio de 2 X 2 puntos, la matriz de covarianza sería de 8 X 8 elementos, esto indica que en casos reales el cálculo y procesamiento de B es imposible. En la práctica se emplean varios recursos para simplificar y reducir la matriz. Primeramente, se selecciona sólo un subconjunto de variables en los campos iniciales que se denominan “variables de control del análisis” con la condición de que sus correlaciones mutuas sean mínimas, se establecen dependencias por regresión para los balances y se usa un modelo gaussiano para la distribución de los errores, utilizando como parámetro la varianza, de ahí el requerimiento de que la distribución de dichos errores sea normal. (Hu et al, 2015)

Las sucesivas versiones de GSI incluyen en el paquete de distribución algunas variantes de matrices B construidas para casos generales de modelos globales y regionales, no obstante, para asegurar un resultado óptimo de la asimilación, B debe construirse con series que correspondan con la configuración del experimento o corrida operativa que pretende mejorarse. Existe un utilitario para la construcción de B , llamado “Gen_BE” (Descombes et al., 2015), que está disponible dentro del sistema de asimilación WRF_DA y también como un programa independiente que puede tributar al GSI. Para la obtención de una matriz B consistente se recomienda procesar series de campos iniciales de más de un mes (Hu et al, 2015). En este trabajo se empleó el módulo WRFDA (método 3DVAR) para asimilar los datos de radares y otros tipos de observaciones puntuales. Este módulo de asimilación de datos dispone de un fichero de matrices de covarianza genérico (el conocido como be.dat) de la opción CV3, que viene por defecto dentro del código fuente. Este fichero viene construido a partir de 357 casos de los datos globales del modelo GFS y a partir de las diferencias entre 24 y 48 horas de estos pronósticos para una resolución espectral T170, además de que tienen más de 10 años de antigüedad. Normalmente para aplicaciones regionales los rangos de pronósticos que se emplean para la construcción de matrices de covarianza son de +12 y +24 horas de pronósticos, los cuales se construyen con datos a las resoluciones de dominios que se estén empleando (Juanzhen, 2017). Por tal motivo en este trabajo se encuentra que empleando la matriz de covarianza CV3 se producen inconsistencias físicas en los resultados de la asimilación de datos, ejemplo de esto es en la Figura No.8 (a y b).



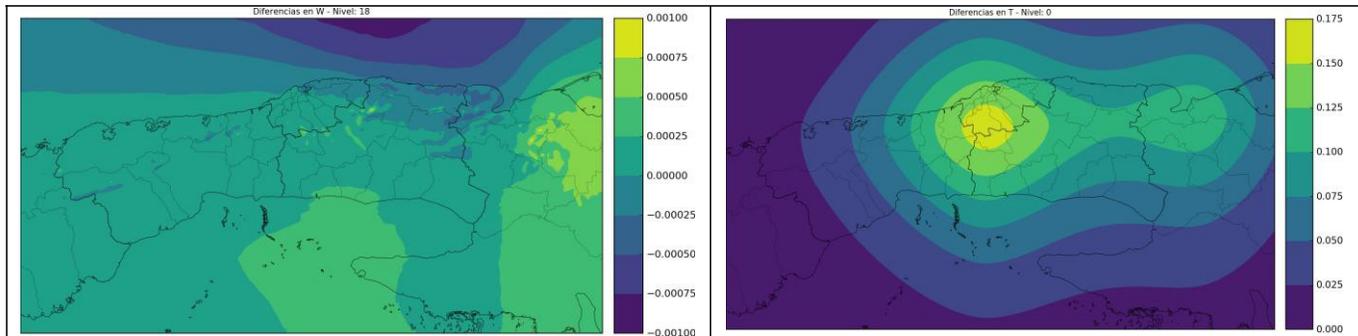


Figura No.8: Diferencias en los resultados de la corrección de la inicialización empleando las opciones CV3 (a y b), CV5 (c y d) y CV7 (e y f).

Estos ejemplos que se muestran con CV3 son el resultado de la diferencia entre los campos iniciales sin asimilación de datos (campos de fondo), y el campo modificado después de asimilar los datos de observaciones de radares y estaciones meteorológicas. Las variables que se muestran son el campo de diferencias de la velocidad vertical (nivel sigma 18) y el de la temperatura cercana a superficie (nivel sigma 0). En la velocidad vertical se observa cómo se generan dentro del dominio de 1km empleado, marcos interiores y otras inconsistencias físicas, mientras que la temperatura genera un gradiente circular hacia el centro de la malla, ambos problemas se deben a que los datos del “be.dat” que se emplean en la corrección de las variables que vienen en la inicialización del modelo no están optimizados para esta aplicación.

Por tal motivo se procedió a la construcción de matrices de covarianzas ajustadas al dominio de 1km empleado, para lo cual se utiliza la herramienta Gen_BE. Este proceso puede tardar aproximadamente 109 minutos construyendo 1 sola matriz de covarianza, lo cual operativamente es un aspecto a tener en cuenta dado a que tiene un alto costo computacional y no se encuentra paralelizado. Para la construcción de las 2 matrices de covarianza (CV5 y CV7) fue necesario simular 62 casos que comprenden las corridas de 1 mes para este dominio (inicializado en cada día a las 0000 UTC y 1200 UTC), esto se debe a que para esta calibración de aplicaciones regionales se recomienda tomar datos de al menos entre 1 y 3 meses. Para esto se emplea el método NMC utilizando la diferencia entre pronósticos hechos con diferentes plazos de antelación para un conjunto de campos iniciales. Finalmente, después de calculadas las matrices de covarianza para las opciones CV5 y CV7 (Figura No.8 (c y d) y Figura No.8 (e y f) respectivamente), se realiza la asimilación de datos con ambas matrices de covarianza calibradas y se obtienen de igual forma que con CV3, los campos de diferencia entre la inicialización con y sin asimilación de datos.

Los resultados obtenidos en la asimilación de datos con las opciones CV5 y CV7 mejoran con respecto a la asimilación con CV3. En el caso de la opción CV5 se ve como mejora los campos de fondo cercanos a superficie, dado por la influencia de las estaciones meteorológicas, que en este caso solo se toman 3 puntos (las observaciones METAR de la Habana y Varadero, y las observaciones de un crucero ubicado en la Bahía de La Habana). Estos 3 puntos son los únicos que se incluyen en el fichero PreBufr del sistema GDAS de la NOAA para este dominio de 1km, debido a que las estaciones meteorológicas del INSMET no se reciben operativamente en este sistema, si se quisieran añadir en la inicialización del dominio de 1 km estudiado, sería necesario realizar algunos pasos adicionales mediante la herramienta OBSPROC en la asimilación de datos.

En el campo de diferencias entre la inicialización con y sin asimilación de datos de la opción CV5 mencionada anteriormente, se obtiene una mejora en niveles cercanos a superficie (Figura No.8 d), pero no ocurre de igual forma con la velocidad vertical (W) en la altura (Figura No.8 c). Para el nivel sigma 18 se observan aun algunos patrones inconsistentes en el diagnóstico de la variable W, lo cual depende del método de diagnóstico de esta variable que se usa en el WRFDA, para esto el módulo de asimilación de datos tiene implementado un método de cálculo basado en las ecuaciones de Richardson.

Donde el ajuste de la velocidad vertical del viento depende dinámicamente de las componentes U y V del viento (Juanzhen, 2017). Para esta calibración la opción CV5 no considera las variables de control de U y V, lo cual implica que en el cálculo de las matrices de covarianza mediante la opción CV5 no se calculen las

relaciones entre variables de control de temperatura, humedad relativa y presión en superficie con las componentes U y V de la velocidad del viento. De ahí que activar el diagnóstico de W empleando CV5 se generen inconsistencias físicas como los obtenidos en la Figura No.8 (c) debido a que se está trabajando con campos de U y V sin corregir.

En el caso de la opción CV7 si se tienen en cuenta las variables de control U y V, junto a temperatura, humedad relativa y presión en superficie. Los mejores resultados obtenidos en la calibración de matrices de covarianza y su aplicación en la corrección de los campos de fondo fue precisamente mediante la opción CV7, mostrando una correcta consistencia en todos los niveles verticales y en los niveles cercanos a superficie, como se puede apreciar en las Figuras 8 (e y f).

3.1.3 Resultados de los experimentos con el caso de estudio 5/12/2018.

En el trabajo se evaluaron múltiples parámetros de configuración relacionados con el tratamiento de las observaciones asimiladas y su influencia sobre los campos de fondo. Para eso se diseñó la Tabla No.2 donde se comparan los resultados obtenidos en 15 experimentos con respecto al campo inicial sin asimilación. La lista todos los experimentos se muestra a continuación, donde se probó cada experimento en las opciones CV5 y CV7 de igual forma, así como también se comparan los resultados obtenidos con la asimilación del radar de Key West y la asimilación del Radar de Casablanca:

ID	CV5 - Opciones	CV7 - Opciones
0	max_ext_its=1, ntxmax = 4, len_scaling=1.0, var_scaling=1.0	max_ext_its=1, ntxmax = 4, len_scaling=1.0, var_scaling=1.0
1	max_ext_its=1, ntxmax = 4, len_scaling=0.5, var_scaling=0.5	max_ext_its=1, ntxmax = 4, len_scaling=0.5, var_scaling=0.5
2	max_ext_its=1, ntxmax = 4, len_scaling=0.25, var_scaling=0.25, orthonorm_gradient=false, thin_conv=false	max_ext_its=1, ntxmax = 4, len_scaling=0.25, var_scaling=0.25, orthonorm_gradient=false, thin_conv=false
3	max_ext_its=1, ntxmax = 4, len_scaling=0.75, var_scaling=0.75, orthonorm_gradient=false, thin_conv=false	max_ext_its=1, ntxmax = 4, len_scaling=0.75, var_scaling=0.75, orthonorm_gradient=false, thin_conv=false
4	max_ext_its=1, ntxmax = 4, len_scaling=0.90, var_scaling=0.90, orthonorm_gradient=false, thin_conv=false	max_ext_its=1, ntxmax = 4, len_scaling=0.90, var_scaling=0.90, orthonorm_gradient=false, thin_conv=false
5	max_ext_its=1, ntxmax = 4, len_scaling=0.90, var_scaling=0.90, rf_passes=4, orthonorm_gradient=false, thin_conv=false	max_ext_its=1, ntxmax = 4, len_scaling=0.90, var_scaling=0.90, rf_passes=4, orthonorm_gradient=false, thin_conv=false
6	max_ext_its=1, ntxmax = 4, len_scaling=0.90, var_scaling=0.90, rf_passes=2, orthonorm_gradient=false, thin_conv=false	max_ext_its=1, ntxmax = 4, len_scaling=0.90, var_scaling=0.90, rf_passes=2, orthonorm_gradient=false, thin_conv=false
7	max_ext_its=1, ntxmax = 4, len_scaling=0.90, var_scaling=0.90, rf_passes=2, orthonorm_gradient=true	max_ext_its=1, ntxmax = 4, len_scaling=0.90, var_scaling=0.90, rf_passes=2, orthonorm_gradient=true
8	max_ext_its=1, ntxmax = 20, len_scaling=0.90, var_scaling=0.90, rf_passes=2, orthonorm_gradient=true	max_ext_its=1, ntxmax = 20, len_scaling=0.90, var_scaling=0.90, rf_passes=2, orthonorm_gradient=true
9	max_ext_its=1, ntxmax = 100, len_scaling=0.90, var_scaling=0.90, rf_passes=2, orthonorm_gradient=true	max_ext_its=1, ntxmax = 100, len_scaling=0.90, var_scaling=0.90, rf_passes=2, orthonorm_gradient=true
10	max_ext_its=1, ntxmax = 100, len_scaling=0.90, var_scaling=0.90, rf_passes=2, orthonorm_gradient=true, thin_conv=true, thin_mesh_conv=20	max_ext_its=1, ntxmax = 100, len_scaling=0.90, var_scaling=0.90, rf_passes=2, orthonorm_gradient=true, thin_conv=true, thin_mesh_conv=20
11	max_ext_its=1, ntxmax = 100, len_scaling=0.90, var_scaling=0.90, rf_passes=2, orthonorm_gradient=true,	max_ext_its=1, ntxmax = 100, len_scaling=0.90, var_scaling=0.90, rf_passes=2, orthonorm_gradient=true,

	<code>thin_conv=true,thin_mesh_conv=5</code>	<code>thin_conv=true,thin_mesh_conv=5</code>
12	<code>max_ext_its=1, ntxmax = 100, len_scaling=0.90, var_scaling=0.90, rf_passes=2, orthonorm_gradient=true, thin_conv=true,thin_mesh_conv=200</code>	<code>max_ext_its=1, ntxmax = 100, len_scaling=0.90, var_scaling=0.90, rf_passes=2, orthonorm_gradient=true, thin_conv=true,thin_mesh_conv=200</code>
13	<code>max_ext_its=1, ntxmax = 20, len_scaling=1.5, var_scaling=1.5, rf_passes=2, orthonorm_gradient=false, thin_conv=true,thin_mesh_conv=20</code>	<code>max_ext_its=1, ntxmax = 20, len_scaling=1.5, var_scaling=1.5, rf_passes=2, orthonorm_gradient=false, thin_conv=true,thin_mesh_conv=20</code>
14	<code>max_ext_its=1, ntxmax = 20, len_scaling=0.90, var_scaling=0.90, rf_passes=2, orthonorm_gradient=false, thin_conv=true,thin_mesh_conv=20</code>	<code>max_ext_its=1, ntxmax = 20, len_scaling=0.90, var_scaling=0.90, rf_passes=2, orthonorm_gradient=false, thin_conv=true,thin_mesh_conv=20</code>
15	Condiciones iniciales sin asimilación de datos	Condiciones iniciales sin asimilación de datos

Tabla No.2: Pruebas de sensibilidad de las opciones del WRFDA para el tratamiento de las observaciones.

Uno de los parámetros más importantes en la asimilación de datos mediante las opciones CV5 y CV7 son el `var_scaling` y `len_scaling`, los cuales controlan los pesos que se le asignan a las perturbaciones introducidas con las observaciones sobre el campo de fondo de las variables de control, regulando para cada una la influencia de estas a través de la varianza y longitud de escala. En los experimentos del 0 al 4 se prueban diferentes valores de estos parámetros, donde en el caso de `var_scaling = 1.0` y `len_scaling = 1.0`, significa que no se produce una afectación de los valores de los campos de variables de control, mientras que si el valor es menor de 1.0 se produce una reducción de las magnitudes de estas variables, y lo contrario si el valor es mayor que 1.0. En los experimentos realizados se utilizan los valores de 1.0 (sin modificación), 0.5 (reducción del 50%), 0.25 (reducción del 75%) y 0.75 (reducción del 25%), los cuales son los experimentos No.0, No.1, No.2, y No.3 respectivamente, donde finalmente en el experimento No.4 se obtuvo la mejor calibración con 0.9.

Los experimentos No.5 y No.6 permitieron evaluar la cantidad de pases del filtro recursivo, con valores de 4 y 2 pases respectivamente, obteniéndose mejores resultados con solo 2 pases, en el caso de los experimentos del 0 al 4 se deja el valor por defecto de 6 pases. En los experimentos del 7 al 12 se prueban diferentes valores de `ntmax` (cantidad de iteraciones) y `thin_mesh_conv` (radio de influencia de las observaciones en km) activando la opción del gradiente conjugado. En la prueba 13 se evalúa la influencia de valores de `len_scaling=1.5` y `var_scaling=1.5` (produciendo un incremento del 50% de las magnitudes de las variables de control). En la prueba 14 se prueban una selección de todos los parámetros evaluados entre los experimentos 0 y 13. Por otro lado la prueba 15 corresponde a la inicialización sin asimilación de datos. Todos los resultados obtenidos en cada prueba se muestran en las Figuras No.10 (a-d) y No.11 (a-d), que corresponden al análisis de la Temperatura y Velocidad del Viento respectivamente. Las verificaciones de todos los campos iniciales resultantes en cada experimento se comparan con datos de estaciones meteorológicas del INSMET, las cuales no vienen en el fichero de observaciones PreBuf del sistema GDAS. En la Figura No.10 (a y c) se muestran valores de BIAS de los resultados de la asimilación con el radar de Casablanca empleando las opciones CV5 (a) y CV7 (c), mientras que la Figura No.10 (b y d) corresponden a los valores de BIAS con todas las pruebas realizadas usando la asimilación de datos del radar de Key West, donde la Figura No.10b corresponde a la opción CV5 y la Figura No.10d corresponde a la opción CV7. De igual forma, pero para el caso de la velocidad del viento se muestran los resultados obtenidos en esa variable en la Figura No.11 (a-d). En ambas variables analizadas y considerando todos los experimentos, los mejores resultados con valores de BIAS más bajos se obtienen empleando la opción CV7 y el radar de Casablanca, utilizando la selección de parámetros del experimento 6 (esta configuración se resalta en color morado en la Tabla No.2). Todos los gráficos de las Figuras No.10 (a-d) y No.11 (a-d) responden al diseño de experimentos de la Tabla No.2, destacándose que las barras rojas corresponden a las inicializaciones sin asimilación de datos, y el resto de las barras de color azul son utilizando los mismos identificadores de la Tabla No.2 para su representación en el eje X de los gráficos. En ambas variables analizadas se produce una sobre-estimación de sus valores en todas las inicializaciones, aunque si en todos

los casos se obtienen mejoras con respecto a las pruebas sin asimilación de datos. Para las pruebas realizadas se encontró que la temperatura en todos los experimentos presentó valores de +1.5°C, excepto en el caso de la inicialización sin asimilación de datos que tuvo valores de +2.5°C. En el caso del viento las diferencias estuvieron en el orden de entre +0.5 y +1.0 km/h, mientras que la inicialización sin asimilación de datos estuvo en el orden de +1.9 km/h. Para la mejor configuración encontrada los valores de BIAS de la velocidad del viento fueron solo de +0.3 km/h.

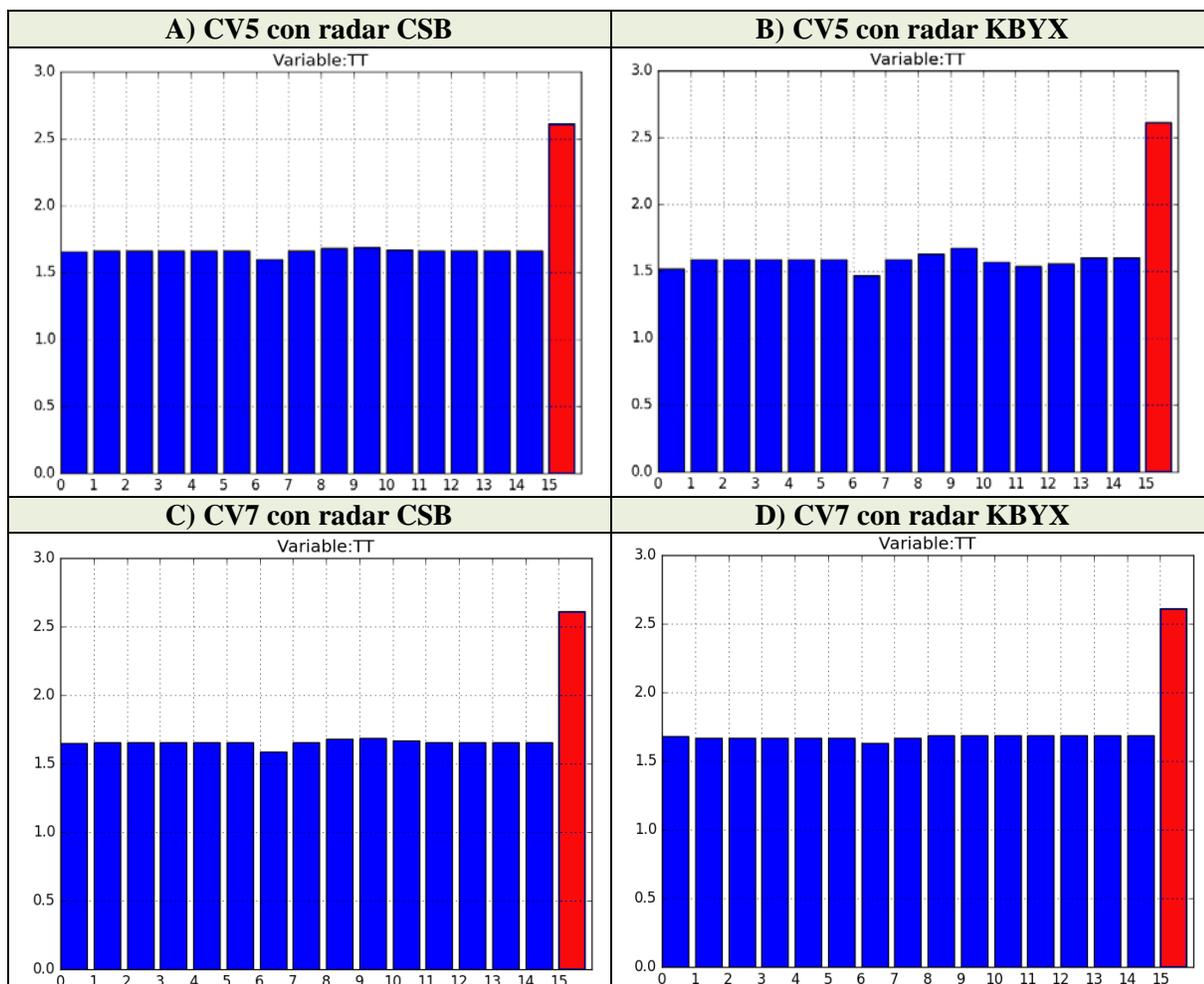


Figura No.10: Pruebas de sensibilidad de las opciones del WRFDA para el tratamiento de las observaciones. BIAS de la temperatura a 2m entre el campo inicial con y sin asimilación de datos, evaluando contra las estaciones del INSMET.

A) CV5 con radar CSB	B) CV5 con radar KBYX
-----------------------------	------------------------------

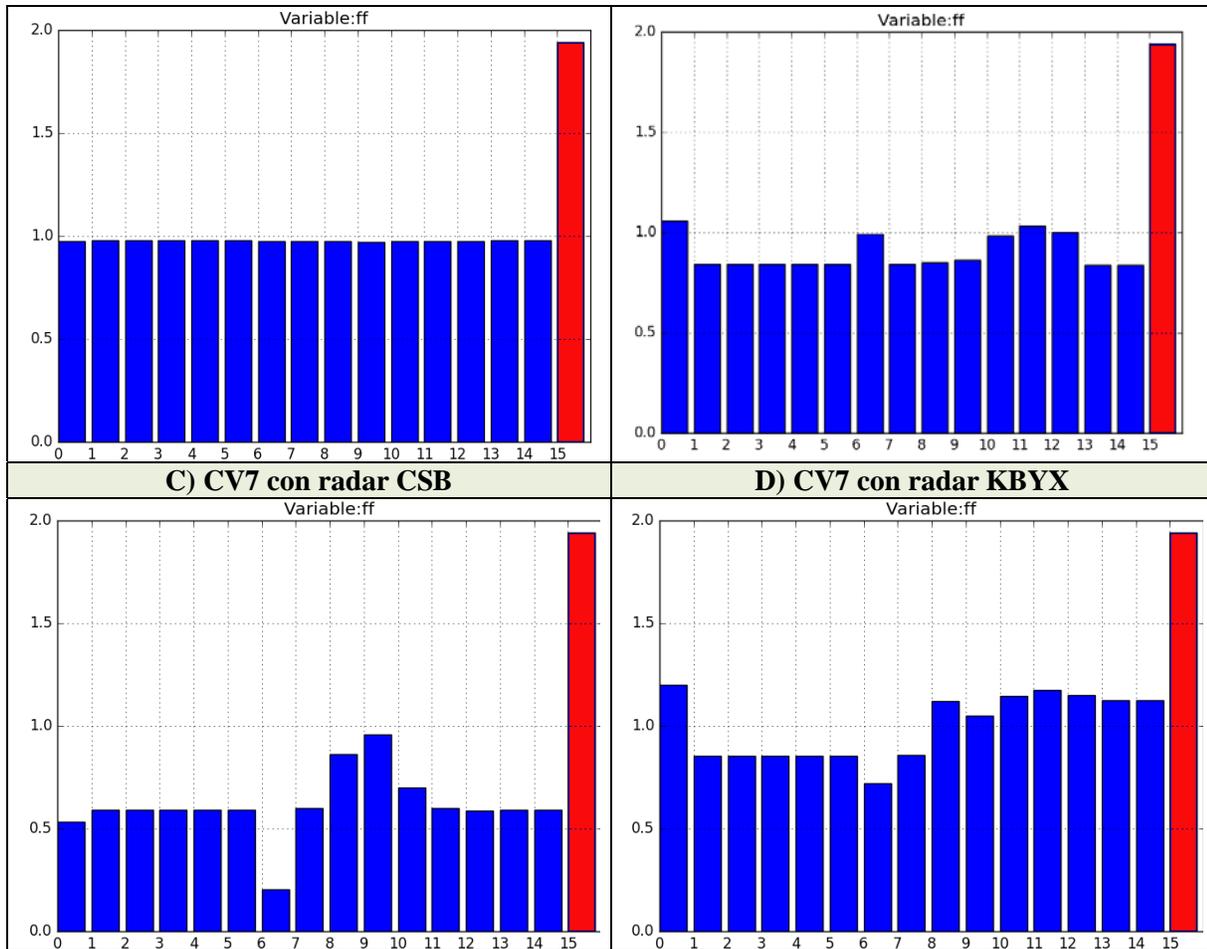


Figura No.11: Pruebas de sensibilidad de las opciones del WRFDA para el tratamiento de las observaciones. BIAS de la velocidad del viento a 10m entre el campo inicial con y sin asimilación de datos, evaluando contra las estaciones del INSMET.

Tomando los campos modificados por el proceso de asimilación de datos empleando el radar de Casablanca y la opción CV7, así como los parámetros empleados en el experimento No.6 (configuración con mejores resultados), se construyeron los mapas de algunas de las variables principales. La Figura 12 (a, b y c) corresponden a las diferencias entre el campo con y sin asimilación de datos para 3 variables en superficie, mostrando buena consistencia física con respecto a los otros experimentos realizados, además de que en este caso fue donde se obtuvieron los menores valores de BIAS con respecto a las estaciones del INSMET. Por otro lado, la Figura No.12d corresponde al campo de diferencias con y sin asimilación de datos para la variable de temperatura en el nivel sigma 18, donde se puede apreciar, como el módulo de asimilación de datos introduce igual patrón nuboso al de la observación de radar.

a) Contenido de vapor de agua a 2m	b) Velocidad del viento a 2m
------------------------------------	------------------------------

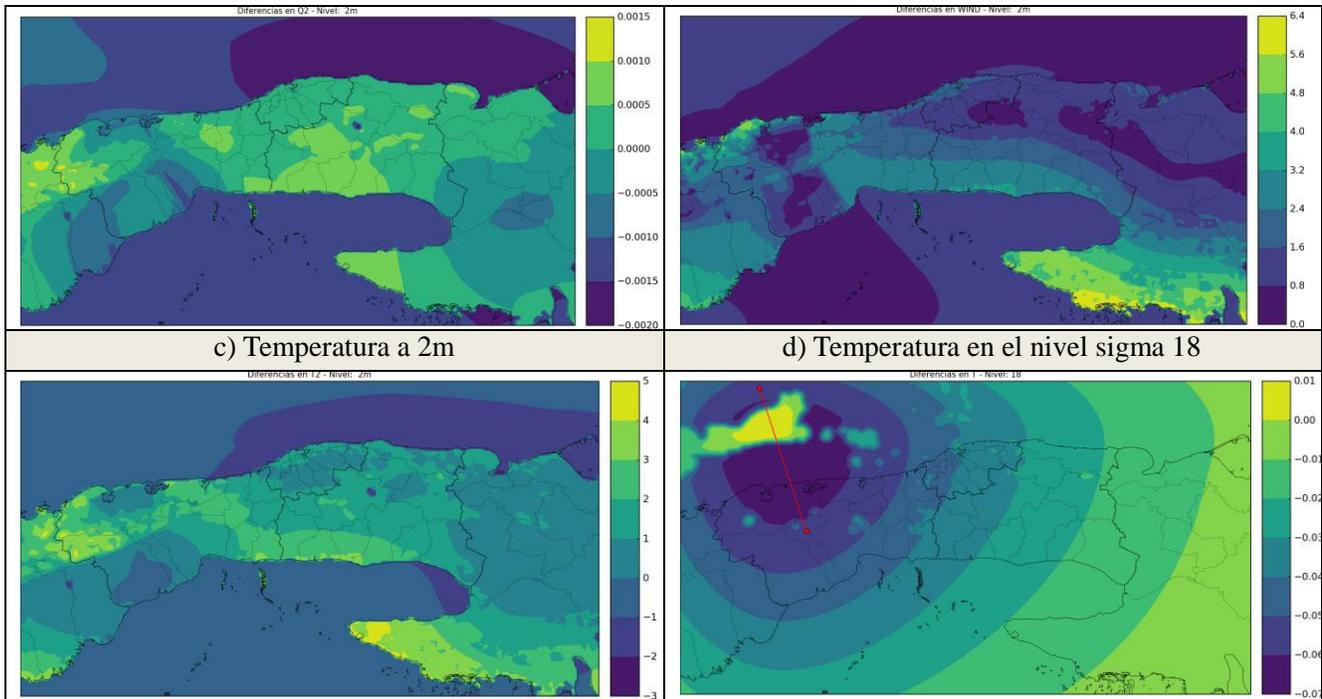


Figura No.12: Campos modificados por la asimilación de datos empleando la configuración CV7, el Radar de Casablanca y las estaciones meteorológicas.

En la Figura No.12d se muestra el área que corresponde a una línea de nublados que está relacionada con el frente frío que afectó al dominio de estudio el día 5 de diciembre de 2018. Sobre esta imagen de las 1200 UTC se traza una línea roja que corresponde a un corte vertical que se muestra en la Figura No.13. En esta última figura se realizan cortes verticales de humedad relativa para la corrida con (Figura No.13a) y sin asimilación de datos (Figura No.13c). En el caso de la corrida con asimilación de datos se ve como se introduce una capa húmeda en los niveles entre 8000 y 12000 m de altura, lo cual corresponde a la nubosidad media y alta que se pudo comprobar en las imágenes de satélites. En cambio, esta capa húmeda en la inicialización del modelo sin asimilación de datos no estuvo presente.

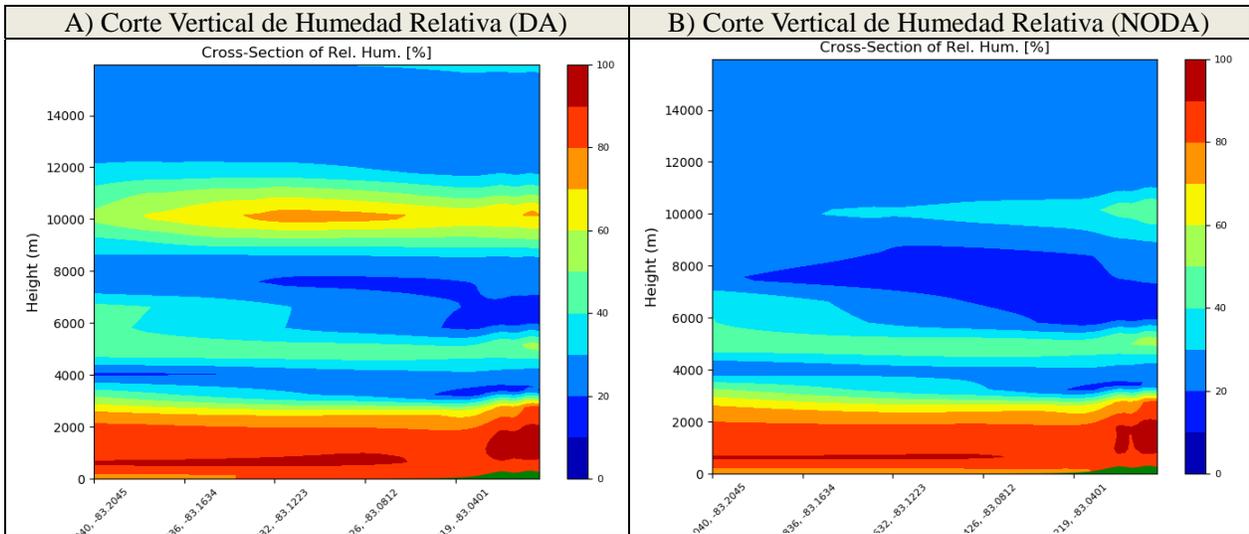


Figura No.13: Corte vertical de humedad relativa con (derecha) y sin (izquierda) asimilación de datos.

3.2 Propuesta de esquema del funcionamiento operativo del SisPI.

El funcionamiento del sistema SisPI actual parte de la descarga del modelo GFS, una vez verificada que la descarga esta correcta se inicia el pre-procesamiento de los datos, donde del dato de GFS se extraen los campos necesarios. En esta etapa se combinan estos campos de variables físicas con campos de variables geográficas y se interpolan a las resoluciones de cada dominio de la simulación, finalmente con esta información se crean las condiciones iniciales y de fronteras y se lanza la integración del modelo.

El proceso de asimilación de datos interviene una vez que se crean las condiciones iniciales y de fronteras, modificando estas a partir de diferentes métodos y teniendo en cuenta las observaciones que se están tomando para asimilar. En esta etapa se pueden tomar desde internet los datos del sistema GDAS (GFS Data Assimilation System) o NDAS (NAM Data Assimilation System), ambos se disponen en tiempo real (retardo de ~ 40 minutos) a través del servicio de descargas de SmartMet del Centro Nacional de Pronósticos del INSMET. Estos brindan información de diferentes tipos de observaciones en formato BUFR (estándar de la OMM) para toda el área geográfica cercana a Cuba. Ambas bases de datos son la fuente de entrada a los sistemas de asimilación de datos que usan operativamente los modelos de la NOAA, pasando por un riguroso proceso de control de calidad. Dentro de los datos que brindan estos sistemas se encuentran los conocidos PREBUFR, los cuales combinan múltiples tipos de observaciones en un mismo fichero. En este se pueden encontrar las observaciones de estaciones METAR, Sinópticas, Boyas, Barcos, Tráfico Aéreo, sondeos y otras fuentes puntuales. Además, en estos sistemas se dispone de otros ficheros en formato BUFR con información de satélites geoestacionarios y de órbita polar, así como también de mediciones de radio-ocultación por GPS.

En el proceso de asimilación de datos también se requiere de la corrección del campo de fondo, para esto es necesaria la calibración de matrices de covarianza con al menos 1 mes de datos de simulaciones realizadas con el modelo WRF. Finalmente, después de haber obtenido estas matrices de covarianza calibradas y los datos de observación procesados, se combinan ambos datos para modificar las condiciones iniciales y de fronteras, y una vez finalizada esta etapa es que se procede con la integración del modelo o inicio de la simulación.

El procesamiento de los datos de observación incluye varias etapas, una vez descargados los datos del GDAS o NDAS desde internet, se deben incluir observaciones locales que no son incorporadas en estos sistemas, ya que no se transmiten internacionalmente, las cuales deben ser sometidas a un proceso de control de calidad también. En este caso se tienen las observaciones de radares, sondeos y los datos de estaciones sinópticas y automáticas de la red del INSMET. En el caso de los datos de radar, estos se encuentran disponibles en formato NEXRAD Level 2 en un servidor dentro de la red interna del INSMET (<ftp://10.0.3.111>) que es administrado por el Centro Nacional de Radares, que se actualiza en tiempo real para todos los radares de Cuba, añadiéndose el radar de Key West, Florida, debido a que el Occidente de Cuba se encuentra bajo la cobertura del mismo. Este último radar se adquiere en tiempo real mediante el servicio de descargas de datos del sistema SmartMet del Centro Nacional de Pronósticos y se publican en el enlace http://10.0.10.232/RAW_DATA/OBS_DATA/ junto a datos de otros radares en el Caribe. Todos estos radares disponen sus datos en un formato que no es compatible con el formato de datos de radar que emplea WRFDA (módulo de asimilación de datos del modelo WRF), por lo que se hace necesario la conversión del dato a formato FM-128, proceso que debe ejecutarse en tiempo real según se reciban las observaciones de radares. En el caso de incluir las observaciones de estaciones meteorológicas locales es necesario el uso de la herramienta OBSPROC disponible dentro del WRFDA para combinar la información descargada de internet con la información de observaciones locales.

Todo este proceso se resume en el siguiente esquema:

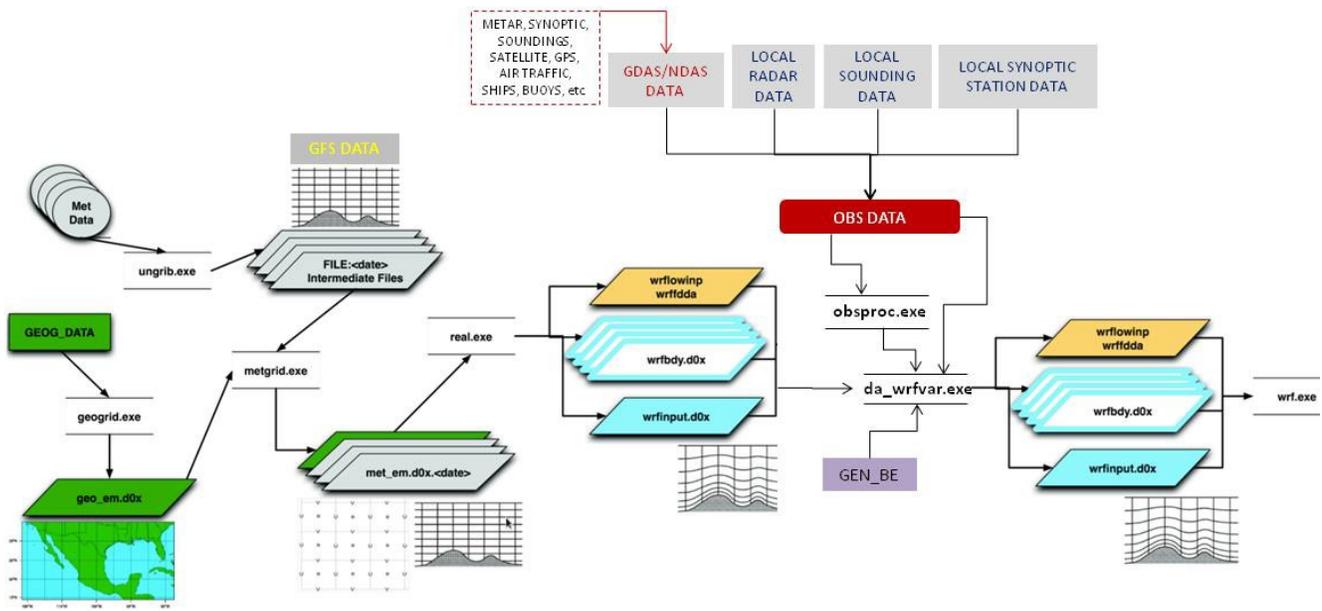


Figura No.16: Esquema del flujo de datos para introducir la asimilación de datos en la inicialización del modelo WRF.

3.3 Experimento propuesto para la asimilación de datos de satélites geostacionarios.

Como parte del resultado de asimilación de imágenes de satélite del proyecto, se ha instalado y configurado el sistema GSI V3.7 en su variante para modelos regionales, en particular para asimilar campos iniciales del modelo WRF-ARW en formato NETCDF (wrfinput). Asimismo, se instaló el Gen_BE V2.0 para la preparación de la matriz B . Aunque la bibliografía consultada con relación a experimentos de asimilación de imágenes de satélites geostacionarios generalmente contrastan casos con asimilación de otras variables (incluidos datos de radiancia de otros satélites) vs. asimilación de otras variables más satélite, Zou et al. (2011), Qin et al. (2013), Yang et al. (2017), Qin y Zou (2018), en aras de simplicidad se puede proponer una comparación entre casos sin asimilación y casos con asimilación de satélites geostacionarios. Los sistemas que corren de forma operativa en el Centro de Física de la Atmosfera (CFA) no hacen hasta el momento asimilación y utilizan como campos iniciales el pronóstico de 6 horas del modelo global GFS, de manera que pueden constituir la referencia para evaluar los experimentos de asimilación. Por otra parte, también son frecuentes los experimentos con varios ciclos de asimilación antes de comenzar la fase de pronóstico Qin et al. (2013), Qin y Zou (2018). En el caso de este proyecto es recomendable iniciar la asimilación con una sola etapa. En Qin y Zou (2018) se describe un método de enmascaramiento para no incluir en la asimilación las zonas con nubosidad, pues para incorporar la radiancia provenientes de las nubes es necesario utilizar métodos más avanzados, basados en ensembles (Zhang et al.,2016).

A partir de la variante implementada del GSI (ARW – netcdf), se propone hacer un estudio de caso donde la matriz B se calcule para una serie de campos wrfinput producidos por el sistema de pre-procesamiento del WRF operativo: ungrrib.exe – metgrid.exe - real.exe durante el período previo recomendado. Los datos de satélite geostacionario provienen de las imágenes espectrales que se reciben en formato NETCDF del GOES 16, disponibles en el Centro de Instrumentos y Métodos de Observación (CIMO) (<http://10.0.4.25>) y en internet pueden ser descargados en el sitio web de http://home.chpc.utah.edu/~u0553130/Brian_Blaylock/cgi-bin/generic_AWS_download.cgi?DATASET=noaa-goes16&BUCKET=ABI-L2-CMIPF. En el documento NASA (2018) se describe el formato y los detalles de los archivos netcdf que contienen las imágenes, así como la codificación de los nombres. En Zou et al. (2011) se presenta una forma de determinar la estadística de errores y sesgo de las imágenes de satélites geostacionarios R , se calcula el sesgo y el error medio cuadrático entre la radiancia de distintos canales y la radiancia resultantes de la aplicación del modelo de transferencia radiativa a pronósticos de 6 horas del ARW, utilizando igualmente alrededor de un

mes de datos. De esta manera el GSI puede producir un nuevo wrfinput a partir de la inicial, con la información de satélite incluida. El esquema de asimilación propuesto es más simple que la generalidad de los estudios revisados en la literatura. Esto cumple con los objetivos de que sea posible de implementar con recursos limitados de cómputo y a la vez, que pueda ser incluido en el servicio operativo de modelación del CFA.

Conclusiones.

En presente trabajo se logró realizar un estudio sobre diferentes esquemas de trabajo para la implementación de la asimilación de datos de radares y satélites meteorológicos en pronósticos numéricos a muy alta resolución espacial. El análisis de todas las referencias consultadas, los resultados de los experimentos consultados, y las herramientas desarrolladas, permitió arribar a las siguientes conclusiones:

- Se comprobó que la calibración de las matrices de covarianza mediante las opciones CV5 y CV7 son de vital importancia para la asimilación de datos de radar, viéndose como con la opción CV3 (matriz de covarianza por defecto del WRFDA) se introducen errores numéricos en el ajuste del campo de fondo. Los mejores resultados fueron obtenidos con la opción CV7.
- La calibración de matrices de covarianza mediante la herramienta Gen_BE presentó algunas limitantes desde el punto de vista operacional, dado a su tiempo de ejecución y volúmenes de datos que requiere.
- Se logró desarrollar una herramienta para la conversión de formato de los datos de radar en NEXRAD LEVEL II al formato FM-128 requerido por el WRFDA, así como otro grupo de scripts que permitirán implementar operativamente el uso de la asimilación de datos dentro del SisPI.
- En las pruebas realizadas se obtuvo que la mejor configuración de parámetros del módulo WRFDA fue empleando la opción CV7 y las opciones del experimento 6, además de la asimilación de dato del radar de Casablanca junto a datos de estaciones meteorológicas.
- Se evaluó la disponibilidad de datos de observaciones meteorológicas en internet y la red interna del INSMET, y se propuso un esquema de trabajo operativo para una nueva versión del sistema SisPI el cual incluya el proceso de asimilación de datos.
- Se estudiaron las características del nuevo satélite GOES-16 y los progresos alcanzados a nivel internacional en el uso de técnicas de asimilación de datos de satélites geoestacionarios. Esto permitió proponer un experimento para avanzar en la implementación operativa de la asimilación de este satélite.

Recomendaciones.

- Extender las pruebas con la asimilación de datos de radar a más casos de estudios.
- Seguir trabajando en optimizar los parámetros de configuración del WRFDA-3DVAR para su uso en la asimilación de radar.
- Comparar los resultados de la asimilación de datos radar mediante el uso del método directo y el método indirecto.
- Explorar mediante la herramienta Gen_BE otras variantes de la calibración de matrices de covarianzas más eficientes operacionalmente.
- Implementar el esquema propuesto para la asimilación de datos de satélites geoestacionarios.

Referencias Bibliográficas.

- Aguilera, D., 2015: Impacto de la asimilación de datos de radiancia medidos por satélite en la simulación del temporal de Agosto 2015 en Chile usando el modelo WRF. Presentación disponible en https://www.researchgate.net/publication/285235178_Impacto_de_la_asimilacion_de_datos_de_radiancia_medidos_por_satelite_en_la_simulacion_del_temporal_de_Agosto_2015_en_Chile_usando_el_modelo_WRF
- Armas, E., 2015: Asimilación de Observaciones de Satélites Meteorológicos en el modelo WRF. Trabajo Diploma. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. La Habana, Cuba.
- Chun Yang, Zhiquan Liu, Feng Gao, Peter P. Childs, and Jinzhong Min. 2017: Impact of assimilating GOES imager clear-sky radiance with a rapid refresh assimilation system for convection-permitting forecast over

Mexico. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. DOI:10.1002/2016JD026436

- Chang, S., Liou, Y., Sun, J., et al., 2016. The implementation of the ice-phase micro-physical process into a four-dimensional variational doppler radar analysis system (VDRAS) and its impact on parameter retrieval and quantitative precipitation now-casting. *J. Atmos. Sci.* 73, 1015–1038.
- Daley, R., 1985. The analysis of synoptic scale divergence by a statistical interpolation procedure. *Monthly Weather Review.* 113, 1066–1079.
- Descombes G., Auligné T., Vandenberghe F., Barker D. M., and Barré J.. Generalized background error covariance matrix model (GEN_BE v2.0). *Geosci. Model Dev.*, 8, 669–696, 2015, DOI:10.5194/gmd-8-669-2015
- Díaz, Y., 2010: Evaluación del pronóstico numérico del tiempo a corto plazo para Cuba con el modelo de mesoescala MM5V3. Tesis en opción al título de Licenciatura en Meteorología. Facultad de Gestión de la Ciencia, la Tecnología y el Medio Ambiente. Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. La Habana.
- F. Bouttier and P. Courtier, 1999. “Data assimilation concepts and methods”. (http://www.ecmwf.int/newsevents/training/rcourse_notes/DATA_ASSIMILATION/ASSIM_CONCEPTS/Assim_concepts.html).
- Frederik Kurzrock, Sylvain Cros, Fabrice Chane Ming, Jason A. Otkin, Axel Hutt, Laurent Linguet, Gilles Lajoie and Roland Potthast5., 2018: A Review of the Use of Geostationary Satellite Observations in Regional-Scale Models for Short-term Cloud , Forecasting Meteorologische Zeitschrift 2018, PrePub DOI:10.1127/metz/2018/0904
- Gao, J. y Stensrud, D, 2012: Assimilation of Reflectivity Data in a Convective-Scale, Cycled 3DVAR Framework with Hydrometeor Classification JOURNAL OF THE ATMOSPHERIC SCIENCES, Volumen 69, <http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JAS-D-11-0162.1>
- Helmus, J.J. and Collis, S.M., 2016. The Python ARM Radar Toolkit (Py-ART), a Library for Working with Weather Radar Data in the Python Programming Language. *Journal of Open Research Software*, 4(1), p.e25. DOI: <http://doi.org/10.5334/jors.119>
- 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.
- Hu, M., G. Ge, C. Zhou, D. Stark, H. Shao, K. Newman, J. Beck, and X. Zhang, 2018: Grid-point Statistical Interpolation (GSI) User’s Guide Version 3.7. Developmental Testbed Center. Available at <http://www.dtcenter.org/com-GSI/users/docs/index.php>, 149 pp.
- Hu, M., G. Ge, C. Zhou, D. Stark, H. Shao, K. Newman, J. Beck, and X. Zhang, 2015: Grid-point Statistical Interpolation (GSI) User’s Guide Version 3.5. Developmental Testbed Center. Available at <http://www.dtcenter.org/com-GSI/users/docs/index.php>, 149 pp.
- Juazhen, S., 2017: NCAR: Radar Data Assimilation with WRFDA. Presentaciones realizadas en el tutorial de WRFDA. UCAR, Boulder, Colorado, USA. http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/wrfda/Tutorials/2017_July/tutorial_presentations_summer_2017.html
- Kalnay, E. (2003). *Atmospheric Modeling, Data Assimilation and Predictability*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Lopez, R.E, 2015: Matemáticas, análisis de datos y Python. Probabilidad y estadística con Python. Consultar en el sitio web: <http://relopezbriega.github.io/blog/2015/06/27/probabilidad-y-estadistica-con-python/>
- Maldonado, P., Ruiz, J. y Saulo, C., 2015: IMPLEMENTACIÓN DE UN OPERADOR DE OBSERVACIONES DE RADAR PARA RADARES DE BANDA C EN EL MODELO WRF <http://repositorio.smn.gov.ar/bitstream/handle/20.500.12160/598/0014SMN2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mesoscale & Microscale Meteorology Division, 2017: “ARW Version 3.8 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
- NASA, 2018: GOES-R SERIES PRODUCT DEFINITION AND USERS’ GUIDE, 416-R-PUG-L2 Plus-0349 Vol 5 Revision 2.0
- Parrish, D.F. and Deber, J.C., 1992: The national meteorological center’s spectral statistical-interpolation analysis system. *Monthly Weather Review.* 120, 1747-1763.
- Qin, Z., X. Zou, F. Weng, 2013: Evaluating Added Benefits of Assimilating GOES Imager Radiance Data in GSI for Coastal QPFs. – *Mon. Wea. Rev.* 141, 75–92, DOI:10.1175/MWR-D-12-00079.1.
- Ruiz, J., Vidal, L., Maldonado, P., Ruiz, S., Salio, P., Garcia, Y., Saulo, C., Nesbitt, S.W, Kalnay, E., Miyoshi, T: Lugar: Local ensemble transform Kalman filter experiments using radar observations: a case study over Central

Argentina. 37th AMS Conference on Radar Meteorology, Norman-Estados Unidos de Norteamérica Fecha: 14-18 de septiembre de 2015 Tipo de documento: Póster

- Sierra, M., Ferrer, M., Hernández, R., González, Y., Borrajero, I, y Rodríguez, R.F., 2014: Sistema automático de predicción a mesoescala de cuatro ciclos diarios. Informe del Resultado No.1 del Proyecto: Sistema de Predicción a muy corto plazo basado en el Acoplamiento de Modelos de Alta Resolución y Asimilación de Datos. Instituto de Meteorología de Cuba.
- Wang, H. y Sun, J., 2013: Indirect Assimilation of Radar Reflectivity with WRF 3D-Var and Its Impact on Prediction of Four Summertime Convective Events. *JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY*. Volumen 52, <https://journals.ametsoc.org/doi/full/10.1175/JAMC-D-12-0120.1>
- Warner, T.T., 2011. *Numerical Weather and Climate Prediction*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 52-58.
- White, A.T., A. Pour-Biazar, K. Doty, B. Dornblaser, R.T. McNider, 2018: Improving Cloud Simulation for Air Quality Studies Through Assimilation of Geostationary Satellite Observations in Retrospective Meteorological Modeling. – *Mon. Wea. Rev.* 146, 29–48, DOI:10.1175/MWR-D-17-0139.1.
- Wu, W.-S., R. J. Purser, and D. F. Parrish, 2002: Three-dimensional variational analysis with spatially inhomogeneous covariances. *Mon. Wea. Rev.*, 130, 2905–2916.
- Xiao, Q., Kuo, YH., Sun, J., Lee, WC, Barker, D.M y Lim, E., 2006: An Approach of Radar Reflectivity Data Assimilation and Its Assessment with the Inland QPF of Typhoon Rusa (2002) at Landfall. *JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY AND CLIMATOLOGY*. VOLUME 46, pp14-22
- Xiao, Q., Kuo, YH., Sun, J., Lee, WC, Lim, E., Barker, D.M y Guo, YR, 2004: Assimilation of Doppler Radar Observations with a Regional 3DVAR System: Impact of Doppler Velocities on Forecasts of a Heavy Rainfall Case *JOURNAL OF APPLIED METEOROLOGY*, Volume 44, pp768-788.
- Xiao, Q. , Lim, E., Won, DJ, Sun, J., Lee, WC, Lee, MS, Lee, WJ, Cho, JY, Kuo, YH, Barker, D.M, Lee, DK y Lee, HS, 2008 : Doppler Radar Data Assimilation in KMA's Operational Forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*. <https://doi.org/10.1175/BAMS-89-1-39>
- Xue, M., D.-H. Wang, J.-D. Gao, K. Brewster, and K. K. Droegemeier, 2003: The Advanced Regional Prediction System (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation. *Meteor. Atmos. Physics*, 82, 139-170.
- Zhang, F., M. Minamide, and E. E. Clothiaux (2016), Potential impacts of assimilating all-sky infrared satellite radiances from GOES-R on convection-permitting analysis and prediction of tropical cyclones, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 2954–2963, doi:10.1002/2016GL068468.
- Zhengkun Qin and Xiaolei Zou., 2018: Direct Assimilation of ABI Infrared Radiances in NWP Models. DOI: 10.1109/JSTARS.2018.2803810, *IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN APPLIED EARTH OBSERVATIONS AND REMOTE SENSING*
- Zou, X., Z. Qin, F. Weng, 2011: Improved Coastal Precipitation Forecasts with Direct Assimilation of GOES-11/12 Imager Radiances. – *Mon. Wea. Rev.* 139, 3711–3729, DOI:10.1175/MWR-D-10-05040.1.