

## **Informe de resultado**

# **Estudio de factibilidad para la asimilación e implementación de modelos numéricos para el pronóstico estacional de la lluvia**

**Proyecto: Estudio de factibilidad para la asimilación e implementación de modelos numéricos para el pronóstico estacional de la lluvia**

**(Centro de Costo INSMET: 600.204.17)  
Proyecto Propio o Institucional**

***Autora principal: Lourdes Álvarez Escudero***

***Coautores: Israel Borrajero Montejo, Arnoldo Bezanilla Morlot, Yandy González Mayor, Yaritza Gómez Villa, Alejandro Vichot Llano, Adrian Ferrer Hernández, Consuelo Fernández Cao, Maibys Sierra Lorenzo, Maydes Bárcenas Castro, Alexis Pérez Bello***

**Centro de Física de la Atmósfera  
Instituto de Meteorología  
2014**

## **Informe de resultado**

# **Estudio de factibilidad para la asimilación e implementación de modelos numéricos para el pronóstico estacional de la lluvia**

**Proyecto: Estudio de factibilidad para la asimilación e implementación de modelos numéricos para el pronóstico estacional de la lluvia**

**(Centro de Costo INSMET: 600.204.17)**

**Proyecto Propio o Institucional**

***Autora principal: Lourdes Álvarez Escudero <sup>1</sup>***

***Coautores: Israel Borrajero Montejo <sup>1</sup>***

***Yandy González Mayor<sup>1</sup>***

***Arnoldo Bezanilla Morlot<sup>1</sup>***

***Yaritza Gómez Villa<sup>2</sup>***

***Alejandro Vichot Llano<sup>1</sup>***

***Adrian L. Ferrer Hernández<sup>1</sup>***

***Consuelo Fernández Cao<sup>1</sup>***

***Maibys Sierra Lorenzo<sup>1</sup>***

***Maydes Bárcenas Castro<sup>1</sup>***

***Alexis Pérez Bello<sup>1</sup>***

(1) Centro de Física de la Atmósfera

(2) Centro de Agrometeorología

**Instituto de Meteorología**

**2014**

**RESUMEN.** Se presenta un estudio de factibilidad para la asimilación e implementación de modelos numéricos para el pronóstico estacional de la lluvia en Cuba. Se realiza un análisis sobre el estado actual del desarrollo de la temática, sobre los modelos globales y los regionales dinámicos utilizados como reductores de escala en el mundo y su desempeño. Se constata que los modelos regionales son en la actualidad utilizados más en la investigación que de forma operativa. Se determina a partir del estudio de las series de acumulados mensuales de precipitación en tres estaciones con condiciones físico - geográficas diferentes que los sistemas mayores productores de acumulados por encima de la media mas una desviación estándar son las hondonadas, las ondas tropicales, la inestabilidad convectiva, las tormentas tropicales y las vaguadas. A partir del estudio de estas mismas estaciones se determina que la mayoría de las lluvias son de carácter convectivo, aunque hay una presencia no nula de la lluvia macroescalar. Se realiza una experiencia de corrida de 2 años para el modelo RegCM y se evalúa su desempeño utilizando diferentes parametrizaciones de la convección, donde se constata que unas sobreestiman y otras subestiman la lluvia, aunque los valores no son extremadamente diferentes a los observados. Se realiza una experiencia con la corrida para tres periodos inicializados en fechas diferentes con el modelo WRF y se obtiene que los acumulados pronosticados subestiman los observados. Se constata en el desarrollo de la experiencia el error que introducen las tormentas tropicales y la influencia de la no linealidad del modelo debido al uso de diferentes condiciones iniciales. Se sugiere que se establezca el uso de uno o varios modelos regionales para el pronóstico estacional de la lluvia en Cuba y se sitúan los principales requerimientos para afrontar el problema, a saber, la necesidad de formación de recursos humanos en la temática, el aumento de la capacidad de cómputo, la necesidad de datos iniciales y de frontera para alimentar los modelos regionales, el aumento de la conectividad para garantizar el flujo de información y el incremento de la capacidad de almacenaje. Se sugieren las líneas para el futuro trabajo en la temática.

## ÍNDICE

Resumen	2
Índice	3
Introducción	4
Estado actual del desarrollo de los pronósticos estacionales en el mundo	6
Principales modelos numéricos de pronóstico estacional en el mundo	7
Antecedentes de pronóstico estacional en Cuba	14
Determinación de los sistemas que proporcionan mayores acumulados mensuales de lluvia en Cuba	15
Proporción de lluvias macroescalas o convectivas para cuatro estaciones de Cuba, clasificadas a partir del código de tiempo presente	19
Valor agregado de los modelos regionales mesoescalares para el pronóstico estacional de la lluvia	21
Modelos regionales mesoescalares de pronóstico estacional de la lluvia en el mundo	23
Experiencia de un pronóstico a largo plazo con el modelo RegCM	27
Experiencia de un pronóstico a largo plazo con el modelo WRF	32
Factibilidad para la asimilación e implementación de modelos numéricos para el pronóstico estacional de la lluvia	44
Referencias	45

## Introducción.

La predicción meteorológica ha sido una materia de suma importancia para el desarrollo social. En las últimas décadas asociado al desarrollo de la computación, los llamados Pronósticos Numéricos dan una respuesta cada vez más certera del comportamiento de la atmósfera desde niveles globales hasta mesoescalares y desde pronósticos a muy corto plazo de escasas horas, hasta proyecciones del clima para un centenar de años.

Los modelos numéricos necesitan para su integración de condiciones iniciales y aquellos de área limitada condiciones de frontera, aunque los modelos globales también tienen frontera en su interacción con la superficie. Los datos iniciales generalmente están conformados por las observaciones de las estaciones meteorológicas de superficie y datos de boyas con densidad muy poco uniforme espacialmente e información de satélites entre otras fuentes. Estos datos son validados e interpolados hacia una rejilla regular de puntos. Los datos de la atmósfera en la vertical son aún más escasos. Todo esto hace que la determinación de la condición inicial para la simulación numérica sea un problema complicado. Para solventar este problema en la práctica se recurre a técnicas de asimilación de datos donde los resultados de una predicción a corto plazo de un modelo numérico para un instante dado y los datos observados para ese instante son combinados para dar lugar al análisis, que es un consenso del estado tridimensional de la atmósfera, que incluye toda la información observacional que se ha podido aprovechar y tiene la consistencia dinámica entre las variables proporcionadas por el modelo (Herrera, 2011). Se puede decir que el análisis es la mejor aproximación disponible al estado real tridimensional de la atmósfera, sin embargo, al ser un producto generado con un modelo numérico dado, el análisis tiene la resolución espacial de éste e incluye sus posibles limitaciones en cuanto a su formulación. A medida que los modelos evolucionan y mejoran, los análisis mejoran tanto en resolución como en la representación de las variables aunque algunas de las variables proporcionadas por el análisis no son observadas o no son asimiladas y son el resultado de la simulación del modelo únicamente, un ejemplo es la precipitación. Esto hace que los análisis históricos vayan cambiando en resolución y calidad, pudiendo dar lugar a tendencias a largo plazo. Para evitar este fenómeno, se realizan reanálisis, donde se asimilan de nuevo todos los datos observados disponibles con una versión fija del modelo.

Dado que la capacidad de observar la condición inicial con absoluta precisión y cobertura es limitada, la predicción del estado de la atmósfera al cabo de un cierto tiempo se deteriora aunque se dispusiera de un modelo perfecto. En la práctica, este hecho sumado a la imperfección de los modelos hace que no sean viables predicciones deterministas más allá de unos pocos días. Esta predicción del estado exacto de la atmósfera debido al conocimiento de las condiciones iniciales se conoce como “predictibilidad de primera especie”. La forma de extender este horizonte de predicción es realizar la llamada predicción por conjuntos.

A pesar de que el carácter caótico de la atmósfera acabe con la predictibilidad de primera especie al cabo de unos días, el modelo numérico, si se deja evolucionar, sigue resolviendo las mismas ecuaciones y generando secuencias de estados de la atmósfera que, aunque no coincidan con los observados, son compatibles con los forzamientos externos del sistema. Estos forzamientos externos dependen de las componentes del sistema climático que incluya el modelo, por ejemplo, si el modelo es únicamente atmosférico, la temperatura de la superficie del océano sería un forzamiento externo. Aunque el modelo incluyese todas las componentes del sistema climático, la cantidad de radiación solar que recibe sería un forzamiento externo. A pesar de perder la capacidad predictiva de primera especie, estas secuencias de estados asociadas a los forzamientos o condiciones en la frontera

proporcionan información útil sobre las variables meteorológicas relacionadas con sus funciones de densidad de probabilidad (PDF). A esta capacidad predictiva se la conoce como “predictibilidad de segunda especie”. Al obtener una PDF a partir de una serie temporal se pierde toda la información de la secuencia temporal de los estados. Sin embargo, la PDF proporciona una cantidad notable de información sobre el estado medio, el más probable, la probabilidad de que ocurran sucesos extremos que superen un cierto umbral, etc. Más aún, aunque se disponga únicamente de predictibilidad de segunda especie, el modelo sigue ofreciendo series temporales de las que se puede obtener otra información más allá de su PDF, por ejemplo, se pueden obtener estadísticas de la duración de eventos como sequías y frecuencia de aparición de ciertos patrones de variabilidad.

El objetivo de la predicción estacional es inferir las anomalías estacionales con varios meses de antelación por lo que la predictibilidad de primera especie es imposible en la atmósfera. Sin embargo, a medida que dejamos evolucionar un modelo numérico en el tiempo, se va haciendo necesario incorporar nuevos componentes. Uno de estos componentes es la temperatura de la superficie oceánica, que puede mantenerse constante para unos pocos días pero influye marcadamente a medida que extendemos el plazo del pronóstico, por lo que es recomendable acoplar un modelo oceánico al atmosférico o introducir de alguna forma la variación de la condición oceánica.

La Organización Meteorológica Mundial (WWRP/THORPEX-WCRP, 2012) divide para su estudio la predicción a largo plazo en “sub-estacional” de 15 a 30 días y “estacional” hasta un año.

Los estudios de predicción sub-estacional y estacional son materia de amplio debate científico en el mundo y las investigaciones se encuentran en pleno desarrollo debido a la gran cantidad de factores que influyen en el desempeño de los modelos de predicción y que generan incertidumbres.

A Cuba, país eminentemente agrícola, le sería de mucha utilidad el conocimiento con meses de antelación del comportamiento de la precipitación. Conocido esto, el objetivo de la presente investigación es evaluar la factibilidad de asimilar e implementar un modelo numérico para la predicción estacional de la lluvia en Cuba.

Para dar cumplimiento al objetivo, estructuraremos el presente informe como acápite que darán respuesta a las siguientes preguntas.

- ¿Cuál es el estado actual de desarrollo de los pronósticos estacionales en el mundo?
- ¿Qué modelos numéricos se utilizan en el mundo para hacer predicción estacional y cuán bueno son estos modelos?
- ¿Qué antecedentes de pronóstico estacional tenemos en Cuba?
- ¿Qué sistemas son los que proporcionan mayores acumulados mensuales de lluvia en Cuba?
- ¿En qué proporción son las lluvias en Cuba de origen convectivo o macroescalar?
- ¿Bastaría con la información sobre predicción estacional de la lluvia que dan los modelos globales para Cuba?. ¿Sería mejor usar modelos mesoescalares?
- ¿Qué modelos regionales se utilizan en el mundo para la predicción estacional y cuáles podríamos usar en Cuba?
- ¿Se puede realizar una experiencia con algún modelo mesoescalar para el pronóstico estacional de la lluvia en Cuba?. ¿Qué requerimientos necesitaría?
- ¿Qué puede recomendarse sobre el establecimiento de un pronóstico estacional de la lluvia para Cuba y qué líneas de trabajo futuro podrían establecerse?

Dado que la investigación es un estudio de factibilidad, el informe no tendrá la forma clásica de estructurar los trabajos, pero los acápite de forma concisa responderán a las preguntas planteadas, ilustrando los conocimientos obtenidos y desarrollados y dando a modo de

conclusión al final, la recomendación del uso o no de un modelo y qué trabajo se sugiere realizar en el futuro.

### **Estado actual del desarrollo de los pronósticos estacionales en el mundo.**

Como quedó definido en la Introducción, el pronóstico estacional y subestacional supera el rango determinista o de primera especie y únicamente puede lograrse de manera probabilística. Los principales centros que ofrecen este tipo de producto en el mundo lo hacen basados en Predicción por Conjuntos (Ensamblajes) de diversos tamaños, donde los miembros son modelos globales de no muy alta resolución que cambian sus condiciones iniciales de corrida (Fu et al., 2011). En algunos casos los modelos están acoplados a modelos oceánicos y en otros se tienen en cuenta las anomalías previstas u observadas en la temperatura superficial del mar, que constituyen el principal elemento de forzamiento en esta escala. A partir del establecimiento de la predictibilidad del evento “El Niño” (Palmer & Anderson, 1994, Jin et al., 2008) se sentaron las bases para el desarrollo de los pronósticos estacionales y subestacionales de manera operativa.

Existe una serie de elementos importantes que están siendo tenidos en cuenta como los pasos o direcciones de trabajo con vistas a la mejora del pronóstico estacional. En el sumario del Taller de Predicción Estacional y Subestacional del 2011 (WWRP/THORPEX-WCRP, 2012) se han establecido objetivos como determinar el efecto de fuentes de cambio de la temperatura superficial del mar diferentes de “El Niño”, por ejemplo cambios en la temperatura en el Océano Índico, que también son relevantes para pronósticos en otras regiones del mundo. También la mejora en las condiciones iniciales, incluyendo elementos como la Oscilación Madden - Julian mejora el desempeño de los pronósticos estacionales (Chen et al., 2012).

Las parametrizaciones también son objeto de atención, dentro de las condiciones de modelos globales de resolución más bien baja, por ejemplo se han hecho estudios sobre la conexión entre la humedad y la lluvia, que ha mejorado la respuesta a eventos como El Niño y la Oscilación Madden - Julian (Bessafi & Wheeler, 2006).

Otro aspecto en desarrollo es la especificación en la predicción por conjuntos de los parámetros asociados al tipo - uso de suelo (land processes) (Koster et al., 2010, Chen et al., 2010), más allá de datos iniciales de las variables en las capas bajas de la atmósfera y la superficie oceánica. Un ejemplo de ello es la introducción de parámetros perturbados relativos a la cobertura de hielo y nieve, como se hace en los modelos de los Centros del Reino Unido y Canadá, entre otros

Otro aspecto en evaluación es el estado de la estratosfera (Kuroda, 2008), que aunque no es una condición bien conocida, se está estudiando el efecto de la inclusión de niveles estratosféricos, con casos de estudio conocidos de efectos en la zona extratropical.

Otro aspecto importante es la evaluación a partir de los pronósticos previos (hindcast), cuyas salidas pueden ser evaluadas desde el punto de vista estadístico (Model Output Statistics MOS) y de los que se pueden obtener desviaciones sistemáticas que pueden ser entonces aplicadas como correcciones a los pronósticos operativos (Wilks & Hamill, 2007).

Adicionalmente a los pronósticos ofrecidos por los diferentes servicios nacionales, hay un número de proyectos que involucran de manera conjunta las salidas de modelos de varios países, o de varias entidades de un país, formando conjuntos o ensembles multi-modelos (Palmer et al., 2004, Vitart et al., 2007).

La determinación de cuán buenos son los modelos en la información que brindan, cuán cerca pueden estar de la realidad y de que forma debe darse e interpretarse esta información es otra de las líneas de trabajo fundamentales en la temática de los pronósticos estacionales

(Murphy, 1993, Gilleland et al., 2009, Weigel & Mason, 2011). La mayoría de los modelos evalúan las variables de los campos obtenidos con la corrida de sus pronósticos previos y los comparan con bases de datos de reanálisis establecidas, dando información sobre correlación, errores u otros estadígrafos que permitan evaluar la efectividad de los métodos. También se evalúan las propuestas que emanan de los estudios de sensibilidad para introducir mejoras en los modelos.

En resumen podría sintetizarse que los aspectos actualmente en estudio para el desarrollo de los modelos sub-estacionales y estacionales son (WWRP/THORPEX-WCRP, 2012):

- Identificación de las fuentes potenciales de predictibilidad y su representación en los modelos.
- Identificar las situaciones en que mejor dan los pronósticos.
- Investigar la mejor forma de inicialización del modelo, la influencia de la inicialización de modelos acoplados y la asimilación de datos.
- Papel de la resolución del modelo en su desempeño.
- Evaluación del grado de impacto que tiene la interacción océano - atmósfera sobre el desempeño del modelo.
- Comparación del desempeño de la predicción por conjuntos contra la de un modelo simple.
- Estudiar la relación entre resolución del modelo y parametrizaciones (convección, condensación macroescalar, radiación, interacción con la superficie, turbulencia, ondas gravitatorias).
- Definición de metodologías comunes para la evaluación del desempeño de los modelos.

### **Principales modelos numéricos de pronóstico estacional en el mundo.**

Los principales sistemas de predicción sub-estacional y estacional en el mundo están conformados por modelos globales y de predicción por conjunto y su diferencia fundamental está dada en si son modelos acoplados océano - atmósfera donde se predice la temperatura del mar y otras variables oceánicas o si se introducen anomalías previstas u observadas en la temperatura superficial del mar directamente, con cierto periodo de renovación. Los principales Países y Centros del mundo que corren operativamente modelos de pronóstico estacional y/o sub-estacional y que tributan al Centro Rector para Sistemas de Verificación de Pronóstico a Largo Plazo (Lead Centre for the Long Range Forecast Verification System) de la OMM [<http://www.bom.gov.au/wmo/lrfvs/gpc.shtml>] son los siguientes:

- Centro Europeo - GPC - ECMWF: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
- Reino Unido - GPC - Exeter: Met Office, UK
- Japón - GPC - Tokyo: Japan Meteorological Agency
- Canadá - GPC - Montreal: Meteorological Service of Canada
- Corea del Sur - GPC - Seoul: Korean Meteorological Agency
- Australia - GPC - Melbourne: Australian Bureau of Meteorology
- Francia - GPC - Toulouse: Météo-France
- China - GPC - Beijing: Beijing Climate Centre
- Estados Unidos - GPC - Washington: National Centre for Environmental Prediction
- Rusia - GPC - Russia: Hydrometeorological Centre of Russia
- Sudáfrica - GPC - Pretoria: South African Weather Service
- Brasil - GPC - CPTEC: Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

- ISI - International Research Institute for Climate and Society

El ISI, que es Instituto Internacional de Investigaciones para el Clima y la Sociedad, no es un Centro en particular pero brinda información sobre las corridas de los modelos globales que pueden ser usadas por todos los interesados.

Las variables principales de salida de estos modelos y que son motivo de verificación, así como el nombre de los modelos atmosféricos y oceánicos acoplados (allí donde están implementados y la cantidad de miembros del ensemble, se recoge en la Tabla 1. La información sobre el tiempo de pronóstico, la dirección donde puede encontrarse la información sobre el modelo y las referencias de los principales artículos relacionados se resumen en la Tabla 2.

Tabla 1. Principales modelos globales de predicción estacional en el mundo. Las variables de salida a evaluar son temperatura del mar (Tmar), temperatura del aire a 2m (T2m) y precipitación (Prec).

Centro	Nombre del modelo	Tmar	T2m	Prec.	Modelo Atmosférico	Modelo. Oceánico	Cantidad de miembros del ensemble
GPC-ECMWF	ECMWF-S4		X		ECMWF IFS	NEMO	41
GPC - Exeter	GloSea 5		X	X	HadGEM 3	NEMO	42
GPC - Tokyo	JMA/MRI-CGCM	X	X	X	JMA/MRI	MRI.COM	51
GPC - Montreal	CanCM 4		X	X	CanCM3 CanCM4	CanO M4	20
GPC - Seoul	GDAPS	X	X	X	GDAPS		20
GPC - Melbourne	POAMA2	X	X	X	POAMA - 1	ACOM 2	30
GPC - Toulouse	MF Seasonal System	X	X	X	Arpege v4	OPA 8.2	41
GPC - Beijing	BCC_CMS1.0	X	X	X	BCC_AGCM2.2	MOM_L40	48
GPC - Washington	CFSv2	X	X	X	GFS	MOM4	40
GPC - Russia	SL-AV		X	X	SL-AV		20
GPC - Pretoria	ECHAM 4.5		X	X	ECHAM 4.5		6
GPC - CPTEC	AGCMKuo	X	X	X	AGCM		15

Tabla 2. Tiempo de pronóstico, dirección donde puede encontrarse la información sobre el modelo y referencias de los principales artículos relacionados para cada uno de los principales modelos globales de predicción estacional en el mundo

Centro	Tiempo de pronóstico	Dirección para consulta	Referencias
GPC-ECMWF	7 ó 13 meses	<a href="http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/charts/seasonal/forecast">http://www.ecmwf.int/products/forecasts/d/charts/seasonal/forecast</a>	Stockdale et al., 2011
GPC - Exeter	6 meses	<a href="http://www.metoffice.gov.uk/research/climate/seasonal-to-decadal/gpc-outlooks">http://www.metoffice.gov.uk/research/climate/seasonal-to-decadal/gpc-outlooks</a>	Arribas et al., 2011
GPC - Tokyo	7 meses	<a href="http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/model/index.html">http://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/model/index.html</a>	
GPC - Montreal	12 meses	<a href="http://www.weatheroffice.gc.ca/saisons/index_e.html">http://www.weatheroffice.gc.ca/saisons/index_e.html</a>	Scinocca et al., 2008 Arora et al., 2011
GPC - Seoul	6 meses	<a href="http://www.wmolc.org/~GPC_Seoul">http://www.wmolc.org/~GPC_Seoul</a>	
GPC - Melbourne	9 meses	<a href="http://poama.bom.gov.au">http://poama.bom.gov.au</a> <a href="http://www.bom.gov.au/silo/products/poama/">http://www.bom.gov.au/silo/products/poama/</a>	
GPC - Toulouse	7 meses	<a href="ftp://ftp.meteo.fr/dclimdev_ple/wmo_ple">ftp://ftp.meteo.fr/dclimdev_ple/wmo_ple</a> (protegido por contraseña)	
GPC - Beijing	6 meses	<a href="http://bcc.cma.gov.cn/products/">http://bcc.cma.gov.cn/products/</a>	Wu et al. 2008 Wu et al., 2010 Griffies et al., 2005
GPC - Washington	9 meses	<a href="http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/people/wwang/cfsv2fcst/">http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/people/wwang/cfsv2fcst/</a>	Saha et al., 2013
GPC - Russia	4 meses	<a href="http://wmc.meteoinfo.ru">http://wmc.meteoinfo.ru</a>	
GPC - Pretoria	5 meses	( <a href="http://www.weathersa.co.za/LONGTERM/meth_seas.html">http://www.weathersa.co.za/LONGTERM/meth_seas.html</a> )	Landman et al., 2008
GPC - CPTEC	3 meses	<a href="http://clima1.cptec.inpe.br/gpc/pt">http://clima1.cptec.inpe.br/gpc/pt</a>	Cavalcanti et al. 2002 Marengo et al. 2003 Panetta et al. 2006 Coelho et.al., 2005

Existen también predicciones por conjuntos cuyos miembros son diferentes modelos, conocidos como “ensembles multi-modelos”.

La razón de ser de los sistemas multi-modelos es que las investigaciones muestran consistentemente que se obtienen pronósticos estacionales mejores y más confiables combinando las salidas de varios modelos que tomando solamente las de uno solo. En la mayor parte de los casos la combinación multi-modelos resulta mejor que el mejor de los modelos individuales. La explicación principal del beneficio del enfoque multi-modelos es que todos ellos tienen inexactitudes a las que generalmente se les denomina errores, que son lo suficientemente grandes para degradar significativamente los pronósticos hechos a escalas

estacionales. Comparados con los pronósticos a mediano plazo, las señales pronosticadas en la escala estacional son mucho más pequeñas y el tiempo sobre el cual se acumulan los errores es mucho mayor, de ahí que la importancia del error de los modelos sea mucho mayor. Aunque actualmente se trabaja en la disminución de los errores de los modelos, los requerimientos de los pronósticos estacionales son tales que se supone que los errores en ellos sigan siendo un problema crítico durante algunos años en el futuro. Los errores de los modelos y el impacto que estos causan en un pronóstico dado cambian sin embargo, de un modelo a otro de manera que promediando sobre un número de diferentes modelos puede reducirse una parte significativa de este error. No obstante hay algunos errores que tienden a ser comunes a varios modelos de manera que la promediación no es un reemplazo para el desarrollo de los mismos, aun así la promediación multi-modelos es una herramienta muy útil y probablemente permanezca así durante varios años.

Los dos principales proyectos multi-modelos, asociados en la mayoría de sus miembros al Centro Europeo, son DEMETER (Development of a European Multimodel Ensemble System for Seasonal to Interannual Prediction) y EUROSIP (EUROpean Seasonal to Inter-annual Prediction).

El sistema multi-modelos DEMETER (Palmer et al., 2004) está integrado por 7 modelos todos a su vez de predicción por conjuntos y con acoplamiento océano - atmósfera, 3 de ellos pertenecen a instituciones francesas, uno a una italiana, uno al Reino Unido, otro al Instituto Max Planck y el modelo del Centro Europeo. El sitio Web de DEMETER está en la dirección <http://www.ecmwf.int/research/demeter/general/docmodel/index.html> y allí puede obtenerse información sobre pronóstico y evaluaciones del DEMETER en su conjunto o de cada uno de sus miembros. La revista Tellus, Serie A, del año 2005, volumen 57, número 3, es un número especial dedicada al proyecto DEMETER.

El sistema multi-modelos EUROSIP integra 4 modelos, tres europeos (Met Office, Meteo-France, ECMWF) y el NCEP de Estados Unidos en un marco común y su implementación se basó en los resultados obtenidos por el proyecto DEMETER. La información sobre EUROSIP puede ser consultada en la dirección <http://old.ecmwf.int/products/forecasts/seasonal/documentation/eurosip/ch1.html>.

Las salidas de los modelos tanto individuales como multi-modelos pueden brindarse de forma determinista, es decir se dan los valores de la variable de salida en puntos de rejilla o probabilista donde se refiere la probabilidad de que los valores estén por encima, en o por debajo de una cota fijada, como puede ser la media climática para un punto dado. Hay modelos que dan como salida ambos tipos de información. El pronóstico probabilístico más común es el que refleja la probabilidad por “terciles” que se obtienen a partir de las largas series de los valores climáticos, acumulados en base de datos y que fijan tres rangos: “normal”, “por encima de lo normal” y “por debajo de lo normal”.

Para la verificación de los resultados la OMM, según el Centro Rector para Sistemas de Verificación de Pronóstico a Largo Plazo (Lead Centre for the Long Range Forecast Verification System) con dirección Web [<http://www.bom.gov.au/wmo/lrfvs/gpc.shtml>], publica varios índices de desempeño para los diferentes centros que tributan información. Los principales parámetros ofrecidos son el coeficiente de correlación y el “Mean Squared Skill Score” (MSSS) que se usan para pronósticos deterministas solamente. Este último índice es un indicativo de desviaciones de los valores pronosticados y “observados” y evalúa varios tipos de desviación como amplitud, fase y error sistemático. Para pronósticos tanto deterministas como probabilísticos el índice más usado es el llamado “índice ROC” (Relative Operating Characteristics), que es una representación de la sensibilidad o Razón de Verdaderos Positivos frente a (1- especificidad) o Razón de Falsos Positivos para un sistema clasificador binario según se varía el umbral de discriminación.

Existen otros índices de evaluación que pueden ser consultados en la Nota de la OMM No. 485, volumen 1, que puede ser vista en el acápite de documentación en la dirección [<http://www.bom.gov.au/wmo/lrfvs/gpc.shtml>].

Las evaluaciones de los modelos siempre se realizan entre la información de los pronósticos previos (hindcast) corridos por cada uno de los modelos y los valores en rejillas climáticas disponibles como el “Global Precipitation Climatological Project” de NCAR (GPCP) (Adler et al., 2003) o el “Tropical Rainfall Measuring Mision” (TRMM) (Huffman, 1997; Huffman et al., 1997) para la precipitación y la Unidad de Investigación sobre el Clima (CRU) para valores mensuales de varias variables meteorológicas. Los valores de los índices de evaluación pueden darse en forma de mapas o valores en puntos de rejilla. En la Tabla 3 se relacionan para cada uno de los principales centros que tienen modelos globales de predicción estacional en el mundo, el periodo que abarca el pronóstico previo (hindcast) y el número de miembros corridos del ensemble para la obtención de estos pronósticos.

Tabla 3. Periodo de pronóstico previo (hindcast) y número de miembros del ensemble para la obtención de estos pronósticos para cada uno de los Centros con modelos globales de predicción estacional.

Centro	Periodo de “hindcast”	Número de miembros
GPC-ECMWF	1981 - 2010	15
GPC - Exeter	1996 - 2009	12
GPC - Tokyo	1979 - 2007	10
GPC - Montreal	1981 - 2010	20
GPC - Seoul	1979 - 2012	20
GPC - Melbourne	1980 - 2011	99
GPC - Toulouse	1979 - 2007	11
GPC - Beijing	1983 - 2004	48
GPC - Washington	1981 - 2010	20
GPC - Russia	1981 - 2010	10
GPC - Pretoria	1981 - 2001	6
GPC - CPTEC	1979 - 2001	10

El valor de cada uno de estos índices puede consultarse en los sitios particulares de los modelos o en la página del Centro Rector para Sistemas de Verificación de Pronóstico a Largo Plazo (Lead Centre for the Long Range Forecast Verification System) de la OMM [<http://www.bom.gov.au/wmo/lrfvs/gpc.shtml>]. Aquí solo resumiremos algunos indicativos sacados de los pronósticos globales para el área de Cuba, generalmente dividida entre la región occidental y la oriental, regiones entre las cuales puede observarse cierta diferencia. En las Tablas 4 y 5 se muestra la correlación entre anomalías de precipitación pronosticadas por el modelo CPTEC en sus pronósticos previos (hindcast) para el periodo 1979 - 2001 y las observadas según los datos de la Base GPCP v 2.1, y los valores de “mean square skill score” (MSSS) entre los pronósticos previos (hindcast) de precipitación para el periodo 1979 - 2008 dados por el modelo de la Agencia Meteorológica Japonesa y los datos de la Base GPCP.

Tabla 4. Correlación entre anomalías de precipitación pronosticadas por el modelo CPTEC en sus pronósticos previos (hindcast) para el periodo 1979 - 2001 y las observadas según los datos de la Base GPCP v 2.1 para periodos de tres meses dados para la región occidental y oriental del Cuba. El mes referido como inicio se refiere al mes que utiliza el modelo como periodo de auto-educación (spin up).

Mes Inicio	Periodo de pronóstico	Rango de correlación para la región Occidental	Rango de correlación para la región Oriental
D	EFM	0.6 - 0.8	0.2 - 0.4
E	FMA	0.2 - 0.4	-0.2 - 0.2
F	MAM	0.2 - 0.4	-0.2 - 0.2
M	AMJ	0.2 - 0.4	0.2 - 0.4
A	MJJ	0.2 - 0.4	0.2 - 0.4
M	JJA	-0.2 - 0.2	-0.2 - 0.2
J	JAS	0.2 - 0.4	-0.2 - 0.2
J	ASO	0.4 - 0.6	0.4 - 0.6
A	SON	-0.2 - 0.2	0.2 - 0.4
S	OND	0.2 - 0.4	-0.2 - 0.2
O	NDE	0.2 - 0.4	-0.2 - 0.2
N	DEF	0.2 - 0.4	-0.2 - 0.2

Tabla 5. Valores de “mean square skill score” (MSSS) entre los pronósticos previos (hindcast) de precipitación para el periodo 1979 - 2008 dados por el modelo de la Agencia Meteorológica Japonesa y los datos de la Base GPCP para periodos de tres meses dados para la región occidental y oriental del Cuba. El mes referido como inicio se refiere al mes que utiliza el modelo como periodo de auto-educación (spin up).

Mes Inicio	Periodo de pronóstico	Rango de correlación para la región Occidental	Rango de correlación para la región Oriental
D	EFM	0.5 - 0.7	0.5 - 0.7
E	FMA	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3
F	MAM	-0.1 - 0.1	-0.1 - 0.1
M	AMJ	-0.3 - -0.1	-0.3 - -0.1
A	MJJ	-0.1 - 0.1	-0.5 - -0.3
M	JJA	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3
J	JAS	-0.3 - -0.1	-0.1 - 0.1
J	ASO	0.1 - 0.3	0.1 - 0.3
A	SON	-0.3 - -0.1	-0.1 - 0.1
S	OND	-0.1 - 0.1	-0.1 - 0.1
O	NDE	-0.1 - 0.1	-0.3 - -0.1
N	DEF	0.3 - 0.1	-0.3 - -0.1

En la Tabla 6 se muestra la diferencia de precipitación promedio zonal en la zona del Atlántico entre 20 y 30° de LN, entre cada uno de los modelos que incluye el Proyecto DEMETER en el periodo 1979 - 2001 y los datos del GPCP

Tabla 6. Diferencia de precipitación promedio zonal (en mm/día) en la zona del Atlántico entre 20 y 30° de LN, entre cada uno de los modelos que incluye el Proyecto DEMETER (y algunas variantes de ellos) en el periodo 1979 - 2001 y los datos del GPCP. El mes referido como inicio se refiere al mes que utiliza el modelo como periodo de auto-educación (spin up).

Mes Inicio	Diferencia de precipitación promedio zonal ( mm/día)			
	Feb	Mayo	Ago	Nov
Periodo de pronóstico	MAM	JJA	SON	DEF
Modelo				
CERFACS	0.7	0.5	1.2	0.7
ECMWFassim	0.2	0.2	0.2	0.1
ECMWFcontrol	0.1	-0.2	0.7	0.2
ECMWFoper	0.2	0.1	0.5	0.2
INGV	1.1	1.5	0.3	0.6
LODYC	-0.1	-0.2	0.3	0.2
Meteo France CNRM	0.3	0.9	1.2	0.5
Met-Office op UKMO	0.1	0.4	1.1	0.3
Met-Office uc*	0.4	0.3	0.5	0.3
MPI	-0.2	0.3	0.9	0.1
<i>uc*: no acoplado</i>				

De la Tabla 4 se aprecia que las correlaciones suelen ser bajas y en muchos casos negativas, solo el pronóstico para el periodo enero - marzo inicializado en diciembre posee correlación entre 0.6 y 0.8 para la región occidental y el periodo agosto - octubre inicializado en julio entre 0.4 y 0.6 en ambas regiones, los demás valores oscilan entre -0.2 y 0.2, por lo que no podría decirse que el pronóstico es bueno para la zona en estudio, a pesar que las correlaciones para los pronósticos estacionales suelen ser bajas.

Con respecto a la Tabla 5, se nota que aunque los valores de MSSS son bajos abundan los valores negativos lo que significaría que la diferencia media cuadrática entre los valores pronosticados y observados es mayor que el error medio cuadrático de la climatología (variabilidad propia del parámetro comparado). Aquí solo se consideraría como bueno el pronóstico enero - marzo inicializado en diciembre para ambas regiones.

Con respecto a la Tabla 6 y teniendo en cuenta que es el promedio en una amplia zona de estudio, el mejor desempeño lo muestra el Centro Europeo (ECMWF) y su peor trimestre se corresponde con el de septiembre - noviembre donde la zona se encuentra en plena temporada ciclónica.

Los pronósticos pueden apartarse más o menos a los valores observados, pero cada uno de ellos puede además dar valores contradictorios entre sí para un mismo lugar y periodo de predicción. En la figura 1 se muestra el resultado dado por los modelos CPTEC de Brasil y el del Instituto Hidrometeorológico de Rusia para el trimestre marzo - mayo del 2014, inicializado en febrero. Allí pueden verse diferencias marcadas en los rangos normal y por encima de lo normal para las regiones occidental y oriental de Cuba a pesar de ser pronósticos para el mismo periodo.

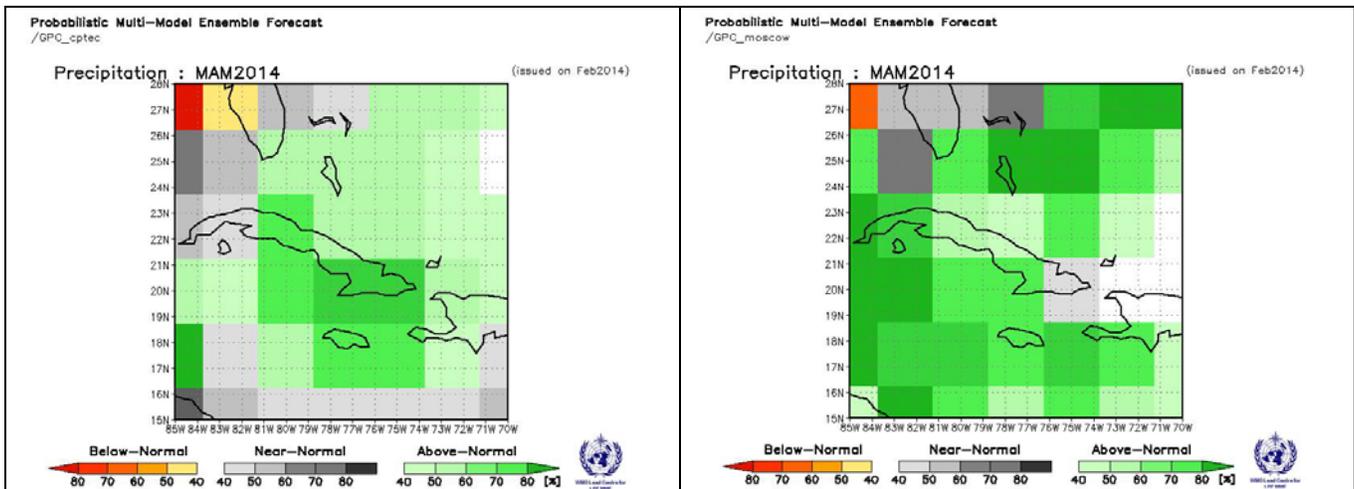


Figura 1. Salida del pronóstico probabilístico de precipitación de los modelos CPTEC de Brasil (izquierda) y el del Instituto Hidrometeorológico de Rusia (derecha) para el trimestre marzo - mayo del 2014, inicializado en febrero.

En general podría decirse que aunque el desempeño de los modelos no es bueno, la información es útil y los modelos globales pueden ser usados como datos de alimentación de modelos regionales mesoescalares de mayor resolución, que pueden calibrarse y adaptarse más a la realidad de la zona de estudio. Hasta donde llega el alcance de esta investigación, datos disponibles para alimentar modelos mesoescalares solo están los del modelo CFSv2 del NCEP, que pueden “bajarse” hasta 6 meses de información de la dirección <http://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/cfs/prod/>. Los productos del CPTEC de Brasil o del Hidrometeorológico de Rusia podrían ser potenciales fuentes de información si se convenían con las instituciones responsables. También el conocimiento más detallado del desempeño de cada modelo con información disponible permitiría establecer un pronóstico como combinación de diferentes modelos, como es el caso de la información dada por el IRI, aunque con las limitaciones que introduce la baja resolución de los modelos globales.

### Antecedentes de pronóstico estacional en Cuba.

La primera referencia que se tiene sobre predicción estacional en Cuba es de 1994 (Cárdenas et al., 1995) cuando se estableció un sistema de pronóstico de totales mensuales de precipitación con un mes de adelanto para toda Cuba y por tres regiones, occidental, central y oriental a partir de la regresión lineal múltiple, pero donde el espacio predictor no involucraba variables asociadas a la circulación general de la atmósfera.

En 1999 Cárdenas (Cárdenas, 1999) estableció un nuevo sistema de totales mensuales de lluvia con varios meses de adelanto y hasta 6 meses, basado en la regresión lineal múltiple, pero donde el espacio predictor incluía índices teleconectivos dados fundamentalmente por la temperatura superficial del mar. El error medio absoluto de las predicciones era bajo, entre 22 y 37 mm y el acierto en el pronóstico de la tendencia a subir o bajar el valor de un mes al siguiente era del 77%.

En la actualidad se ofrece pronóstico con un mes de adelanto para las temperaturas extremas y totales de precipitación para todo el país y por tres regiones basado en los pronósticos ofrecidos por el IRI, a los que se aplica el método de reducción de escala

estadístico implementado en el “Climate Predictions Tools (CPT)” y las conclusiones se dan por criterio de expertos. El pronóstico para la lluvia se da en valores y para cinco rangos con respecto al valor normal climático. La información puede encontrarse en la dirección <http://www.insmet.cu/asp/genesis.asp?TB0=PLANTILLAS&TB1=PCLIMA&TB2=/clima/pronosticoclimatico.htm>. También se da una perspectiva climática para el periodo lluvioso y poco lluvioso del año.

### Determinación de los sistemas que proporcionan mayores acumulados mensuales de lluvia en Cuba.

De manera general en Cuba los acumulados anuales medios de las precipitaciones alcanzan más de 1000 mm, pero estos se distribuyen con una marcada estacionalidad, donde se aprecia un período poco lluvioso de noviembre a abril y un período lluvioso de mayo a octubre, que acumula más del 50% del total anual, dentro del cual existe un mínimo relativo intraestival en los acumulados de las lluvias que se producen en los meses de julio y agosto, reflejando el carácter bimodal de esta estación (Lecha et al., 1994).

En este acápite se identificarán los principales fenómenos meteorológicos que provocan precipitaciones por encima de la media más una desviación estándar en el período estudiado a los que se llamará “acumulados notables”, a partir del análisis de las series de acumulados mensuales para tres estaciones con condiciones físico - geográficas diferentes, a saber, la estación meteorológica de Casablanca (325) con condiciones casi costeras y en la región occidental del país, la estación de Camagüey (355) con condiciones de cierta continentalidad y la estación de Gran Piedra (366) con características de montaña. Las series correspondientes a estas estaciones presentan gran calidad en su información. Los datos generales de ubicación de las tres estaciones en estudio se resumen en la Tabla 7.

Tabla 7. Características de la ubicación de las tres estaciones meteorológicas en estudio.

No	Estación	Latitud	Longitud	Altura (m)	Provincia	Región
325	Casablanca	23° 09´	82° 20´	50.1	La Habana	Occidental
355	Camagüey	21° 24´	77° 51´	118.0	Camagüey	Central
366	Gran Piedra	20° 00´	75° 38´	1130.0	Santiago de Cuba	Oriental

Para poder determinar qué fenómenos producían estos acumulados notables de lluvia se consultaron las siguientes fuentes:

- Estados generales del tiempo del Centro de Pronósticos del INSMET
- Boletines mensuales del Centro del Clima del INSMET
- Mapas del tiempo de archivo del IDICT del INSMET
- Cronologías en existencia en el INSMET de ciclones tropicales, ondas tropicales que afectaron a Cuba, frentes fríos, bajas frías y bajas extratropicales (González, 1999, Pérez et al., 2000).

A partir de estas fuentes de información se establecieron como fenómenos productores de acumulados notables en un mes los siguientes:

- frentes fríos (FF)

- ondas tropicales (OT)
- tormentas tropicales (TT)
- hondonadas o vaguadas (HON)
- vaguadas en la altura (VAG)
- bajas tropicales (BT)
- casos de convección e inestabilidad (CI)

El periodo de estudio abarcó los años entre 1981 y 2010. Aquí podrían haberse tratado las hondonadas o vaguadas y las vaguadas en altura de forma conjunta, ya que el sistema verdaderamente productor de lluvia debería denominarse “onda del oeste”, pero para ganar detalles a la hora de sugerir fechas para experimentos se prefirió hacerlo por separado.

La distribución de casos de acumulados notables por meses para las tres estaciones en estudio y en total se representa en la figura 2. Allí se observa que la mayor ocurrencia se presentó en el período lluvioso del año y la frecuencia de los casos identificados respeta la distribución bimodal de dicho período en Cuba. A pesar de que existen casos identificados en meses como marzo, abril y noviembre, se aprecia claramente que representan menos del 5% del total, por ciento sobre el cual fluctúan los meses de la sequía interestival. Los meses con mayor número de eventos de acumulados notables fueron junio y septiembre y en enero, febrero y diciembre no se presentó ningún caso. De la representación por estaciones se observa una temporada de acumulados notables más corta para las estaciones de Casablanca y Camagüey, ya que no presentan casos ni en marzo, ni en abril y hay un comportamiento contrapuesto entre el número de casos en mayo y junio por estaciones, pues en mayo la mayoría de los casos los aporta la estación de Gran Piedra, mientras en junio lo son las estaciones de Casablanca y Camagüey.

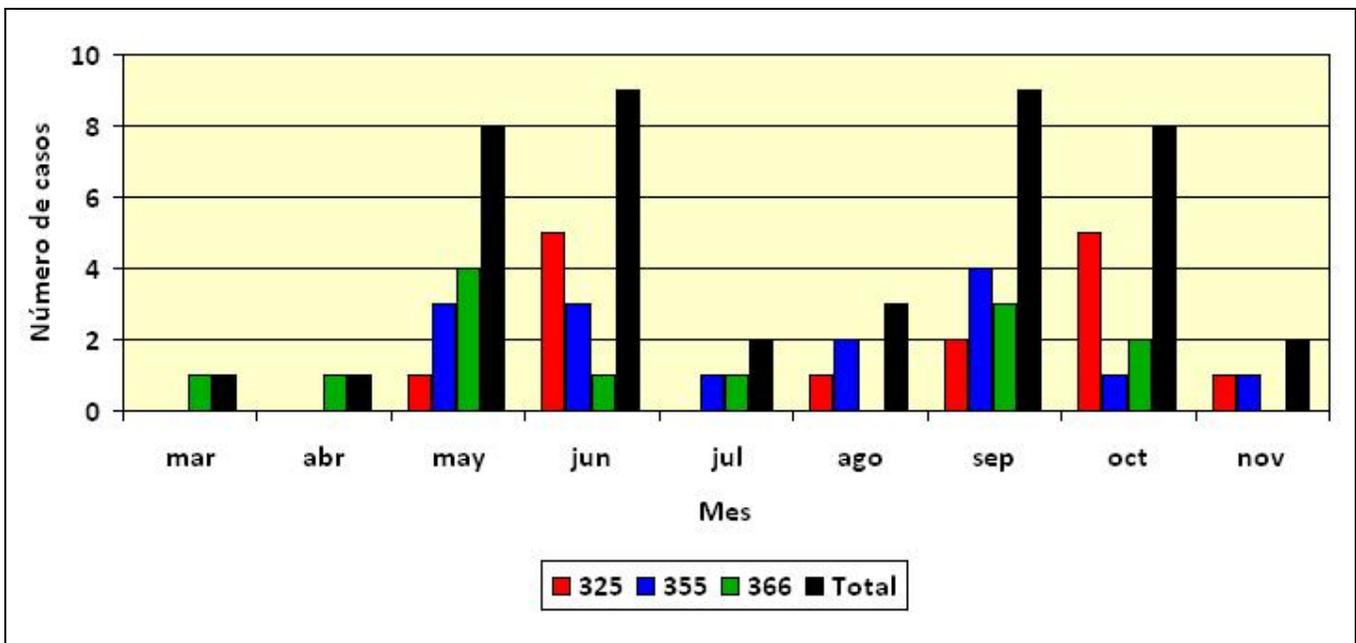


Figura 2. Marcha anual de casos de acumulados notables de precipitación para las tres estaciones en estudio y totales.

Respecto a los sistemas productores de acumulados notables por estaciones y en total el comportamiento puede verse en la figura 3. De la figura se observa que en general el sistema

mayor productor de casos de lluvias notables son las “Hondonadas” (HON), seguido por las “Ondas Tropicales” (OT), los “Casos de convección e inestabilidad” (CI), las “Vaguadas” (VAG) y las “Tormentas Tropicales” (TT). Los “Frentes Fríos” (FF) y las “Bajas Tropicales” (BT) presentan menor representatividad.

Por estaciones para Casablanca los mayores números de casos se asocian a las ondas tropicales, las tormentas tropicales, las hondonadas y los frentes fríos y es el lugar donde es máximo este último sistema por su posición en la costa norte del occidente de la Isla. Para Camagüey las mayores ocurrencias se dan para las hondonadas y la convección en el mismo nivel, de hecho, es el lugar con máximo número de casos de convección, como es lógico por su carácter “continental” y presenta también cierta representatividad para las ondas tropicales. Por su parte Gran Piedra mantiene un balance aproximado entre hondonadas y vaguadas y es la que presenta mayor número de casos para las bajas tropicales.

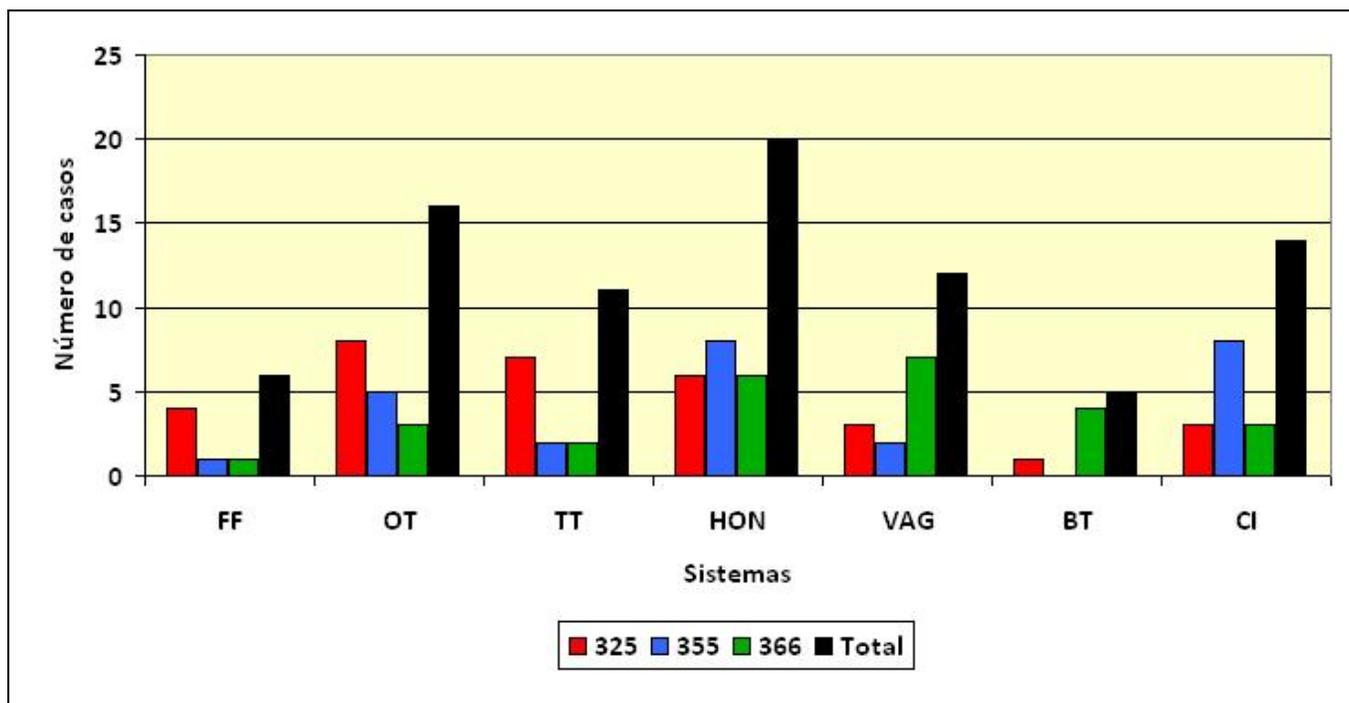


Figura 3. Número de casos por sistemas productores de acumulados notables de lluvia para las tres estaciones en estudio y en total.

Si como parte de futuras investigaciones se pretende analizar que nivel de predictibilidad tiene cada uno de estos sistemas productores de acumulados notables, se debe conocer cuán correctamente son representados ellos en los reanálisis que servirán como fuente de datos para la corrida de los modelos. En la figura 4 se muestra la relación entre sistemas identificados por las series de observaciones y aquellos detectados en los reanálisis. En este caso los reanálisis consultados son los ofrecidos por el NCEP y se usaron para la identificación los mapas de presión en superficie, geopotencial en los niveles de 850, 500 y 200 hPa y los mapas de precipitación.

Los casos de frentes fríos, tormentas tropicales y bajas tropicales coincidieron totalmente con los reanálisis. El caso de convección e inestabilidad no se pudo comprobar, pues en los mapas de reanálisis con que se contaba no estaba reflejado ningún indicativo de estos procesos. El resto de los sistemas (ondas tropicales, hondonadas y vaguadas), no fueron totalmente coincidentes, sobre todo en el caso de las ondas tropicales, aunque es difícil hacer

una evaluación exacta de estos fenómenos en un reanálisis, ya que existe un gran margen de error a la hora de verificar la aparición de los mismos en los mapas sinópticos.

Es conocido que la temperatura superficial del mar es uno de los factores del forzamiento climático por lo que en este caso, la búsqueda de teleconexiones entre la lluvia y fenómenos como “El Niño” es fundamental para los pronósticos a largo plazo. Trabajos anteriores han mostrado cierta relación entre el ENOS y los acumulados de lluvia sobre todo en el periodo seco en Cuba (Cárdenas, 1998). Debido a lo anteriormente expresado se comparó la presencia de evento ENOS, AENOS o la ausencia de estos (NEUTRO) para los meses con acumulados notables de precipitación, lo que se resume en la Tabla 8.

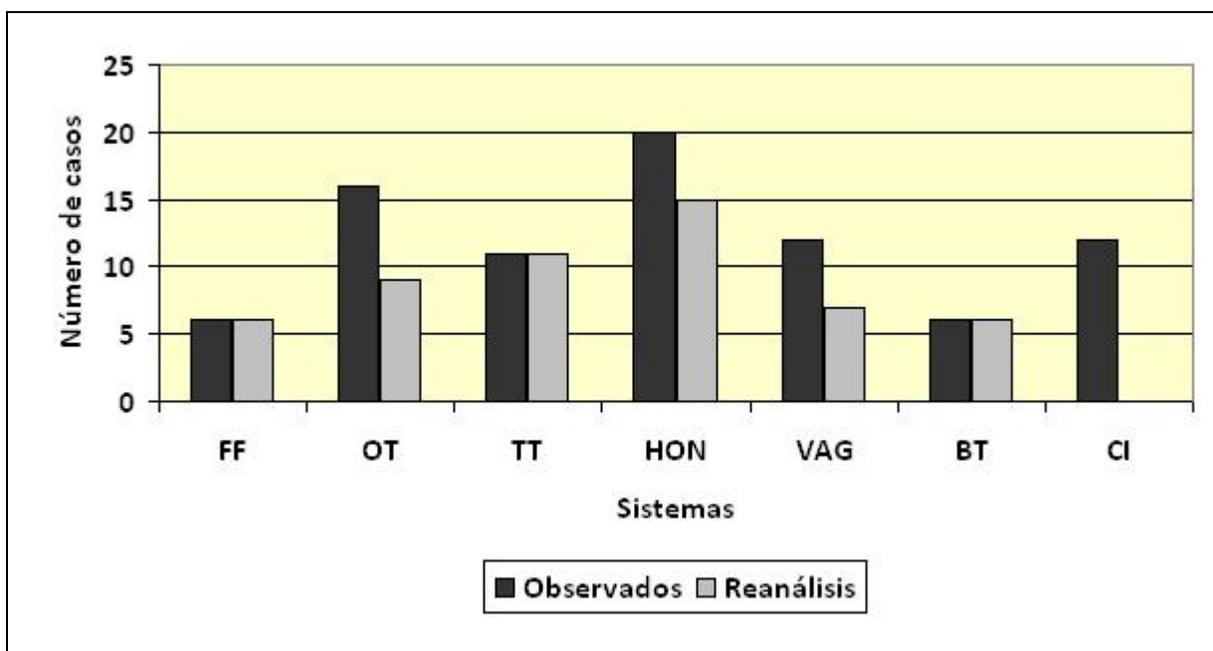


Figura 4. Número de casos de sistemas identificados a partir de las series de datos observados y identificados en los reanálisis.

Tabla 8. Número de casos de acumulados notables de precipitación asociados a eventos ENOS, AENOS o no ocurrencia de ellos (NEUTRO)

Evento/mes	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	Total	%
ENOS	1	1		3			1	1		7	16
AENOS				1		1	5	6		13	30
NEUTRO			8	5	2	2	3	1	2	23	53

De la Tabla 8, se constata que la relación no es directa, aunque predominan los casos “neutros”, con un 53% de ocurrencia, seguido por los AENOS con un 30%. La ocurrencia de eventos ENOS es la más baja. De esto podría sugerirse el estudio de la relación no solo de los acumulados de lluvia notables con los eventos mencionados, sino establecer una relación entre gradientes de temperatura entre varias zonas del Pacífico Ecuatorial y zonas del Atlántico que involucren a Cuba.

Dentro de todos estos casos estudiados de acumulados notables podrían escogerse algunos casos representativos de los sistemas con mayor responsabilidad en la ocurrencia de estos acumulados y que tuvieran representatividad en los reanálisis para poder evaluar de alguna

forma la predictibilidad de cada uno de ellos y su papel dentro de los pronósticos a largo plazo. Las fechas por sistemas recomendadas para la realización de experimentos se recogen en la Tabla 9.

Tabla 9. Fechas recomendadas para la realización de experimentos de predictibilidad para cada uno de los sistemas productores de acumulados notables de precipitación.

Fenómeno	FF	OT	TT	BT	HON	VAG	CI
Exp 1	21/03/1998	02/10/1983	14/10/1999	17/09/1998	02/10/1982	31/05/2003	16/07/2007
Exp 2	16/10/1982	21/07/2007	06/08/1980	02/10/2007	14/06/1983	18/06/2005	09/07/2006

En el caso de las Tormentas Tropicales (TT), la primera se formó a partir de una baja tropical y la segunda en el seno de una onda tropical. En el caso de la convección (CI) en el primer caso hubo presencia de una Tormenta Local Severa (TLS) y en el segundo no. La propuesta denota en general variedad de situaciones por lo que podría diseñarse un experimento que diera luces sobre cuán predecible es cada uno de los sistemas productores de acumulados notables de precipitación en Cuba, para el pronóstico a largo plazo.

**Proporción de lluvias macroescales o convectivas para cuatro estaciones de Cuba, clasificadas a partir del código de tiempo presente.**

En los modelos, los procesos de lluvia pueden ser representados a partir de las variables que se miden y que constituyen la entrada de los mismos, tratando de reproducir los mecanismos físicos formadores de precipitación mediante las llamadas parametrizaciones. Para los procesos de lluvia se distinguen dos mecanismos fundamentales, los asociados a la lluvia producida por sistemas sinópticos que no involucran la convección profunda como los frentes fríos (macroescalar) y los asociados a la convección profunda, como las tormentas de verano (convectiva). Aunque hay un conocimiento empírico de que la mayoría de las lluvias en Cuba son convectivas, no hay ningún estudio que así lo acredite. Para ello con los datos con los que se cuenta podrían relacionarse, por ejemplo, los acumulados de lluvia 6 horarios con la variable código de estado de tiempo presente para tener una de la relación “cantidad - cualidad” de los eventos lluviosos, pero eso involucraría el procesamiento de un amplio volumen de información muchas veces no completa ni disponible.

Aquí trataremos de obtener una idea de la cualidad de la lluvia, analizando las series de código de estado de tiempo presente para cuatro estaciones meteorológicas con condiciones físico - geográficas diferentes que son Casablanca (325), Camagüey (355) y Gran Piedra (366) que ya fueron tratadas en el epígrafe anterior y se sumará la estación de Jamal (356), en la provincia Guantánamo que posee los mayores registros de acumulado de lluvia en Cuba. La estación de Jamal se encuentra en los 20° 17' de LN y los 74° 26' de LW a una altura sobre el nivel del mar de 165 m. Las series utilizadas para el estudio son las de código de estado de tiempo presente, extraídas de la base de datos Nueva\_THOR (Álvarez et al., 2010), para los periodos 1989 - 2010, excepto Jamal que su serie será 1993 - 2010 por no poseer datos de los primeros años.

Los códigos de estado de tiempo presente identificados según el fenómeno son los siguientes:

Lluvias: 21, 23, 24, 60 al 69

Lluvias lejanas: 14, 15, 16

Chubascos: 18, 25 al 27, 80 al 90

Tormentas: 17, 29, 91, 92, 95, 96, 97, 99

Se considerará como lluvia macroescalar la lluvia y la lluvia lejana y como convectiva los chubascos y las tormentas.

En la figura 5 se resume el comportamiento de la ocurrencia de estos códigos para las cuatro estaciones en estudio.

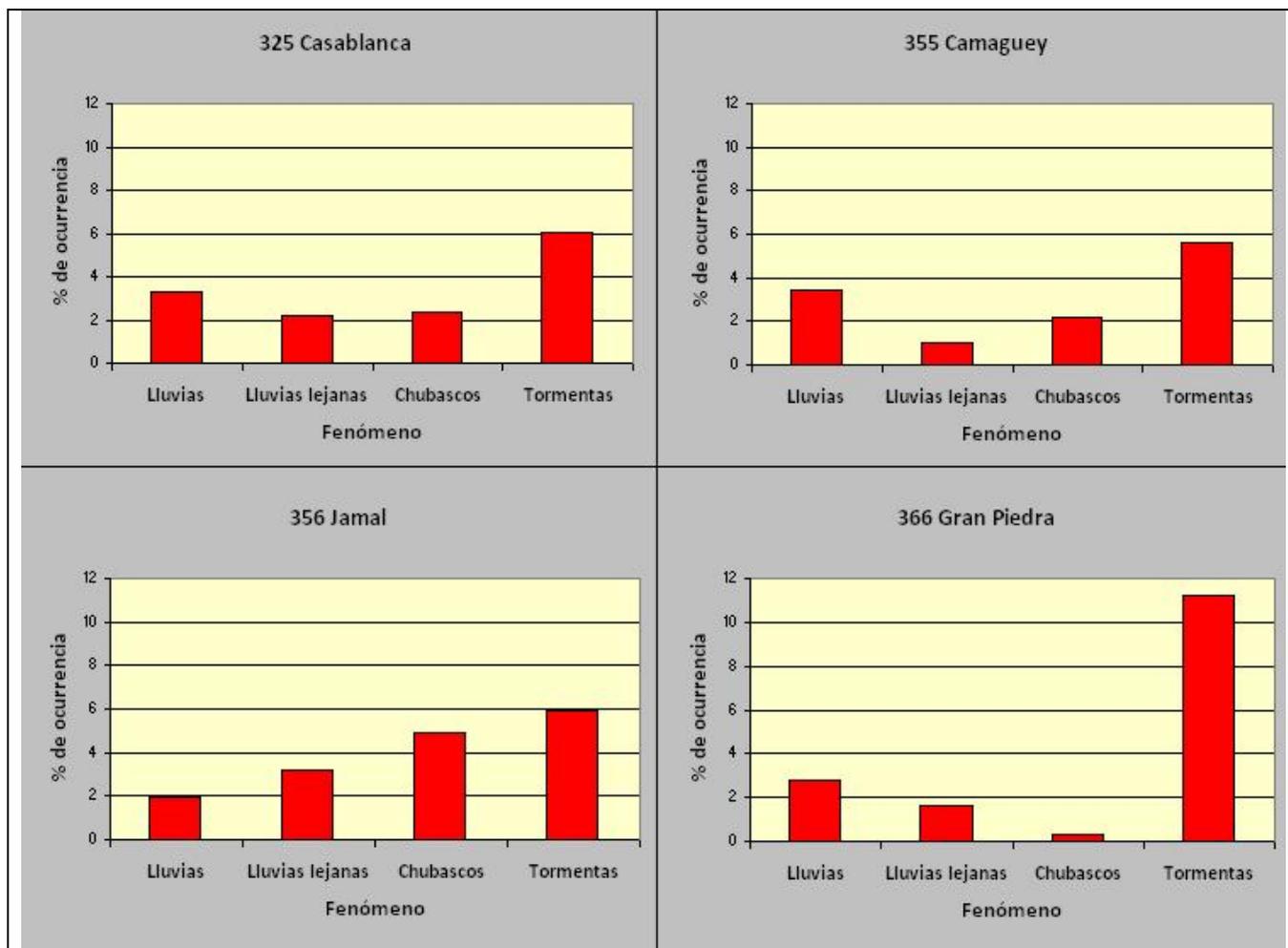


Figura 5. Por ciento de ocurrencia de observaciones con códigos relativos a lluvias, lluvias lejanas, chubascos y tormentas para las cuatro estaciones en estudio.

De la figura se observa que los códigos relativos a lluvia convectiva son más frecuentes con máximo para todas las estaciones en las tormentas, aunque cada estación tiene sus peculiaridades, así en Casablanca y Camagüey se observa una presencia notable de las lluvias, en Jamal de las lluvias lejanas y un máximo en los chubascos con respecto a las demás estaciones y Gran Piedra con la máxima ocurrencia de tormentas y el mínimo de chubascos.

En general puede decirse que desde el punto de vista de su cualidad la lluvia en las estaciones en estudio es fundamentalmente convectiva y esto debe tenerse en cuenta a la hora de escoger los esquemas de parametrizaciones para este tipo de precipitaciones en los modelos, mediante estudios de sensibilidad.

## Valor agregado de los modelos regionales mesoescalares para el pronóstico estacional de la lluvia.

Si se analiza la información que brindan los modelos globales estacionales de pronóstico de la lluvia para Cuba, puede observarse que la información es escasa y poco detallada. De la figura 6 que representa el pronóstico dado por el Centro Europeo y el CPTEC de Brasil para el trimestre febrero - abril del 2014 se observa que valores en puntos de rejilla sobre el territorio cubano, debido a la forma estrecha y alargada de la Isla de Cuba hay aproximadamente 11 puntos y de las distribuciones de los valores se observa que el Centro Europeo no muestra información útil y el del CPTEC muestra una diferencia ligera entre la región occidental y oriental del país, pero no hay diferencias dentro de esas áreas.

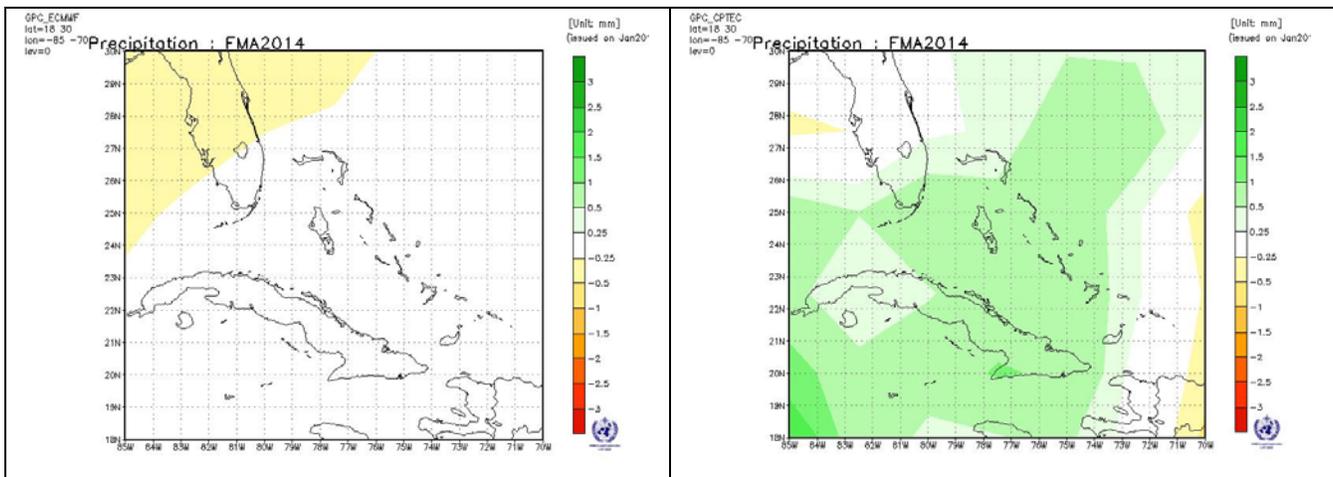


Figura 6. Salida del pronóstico de precipitación de los modelos del centro Europeo ECMWF (izquierda) y de Brasil CPTEC (derecha) para el trimestre febrero - abril del 2014, inicializado en enero.

El valor agregado que se procura en los modelos regionales climáticos es la representación mejorada de los procesos climáticos locales y regionales (Rummukainen, 2010). El concepto de "Downscaling" suscribe el principio básico de que los modelos regionales no deben alterar las simulaciones climáticas en escalas que puedan ser satisfactoriamente representadas a las resoluciones de los modelos climáticos globales (Grotch y MacCracken, 1991, Jones et al., 1995). En aspectos como la precipitación (Feser, 2006) y los vientos costeros (Winterfeldt y Weisse, 2009) se encuentra que típicamente estos resultan mejorados en los modelos regionales en comparación con los modelos globales. Para determinar cuán robustos resultan los detalles incorporados es necesaria la experimentación sistemática con diferentes modelos climáticos regionales y globales (Deque et al., 2005), lo que constituye una motivación para los estudios de predicción por conjuntos (ensembles) (Rummukainen et al., 2004, Giorgi et al., 2008, Giorgi et al., 2009).

En comparación con el downscaling estadístico, los modelos regionales climáticos requieren mayores recursos computacionales, pero ofrecen resultados más abarcadores, como un mayor número de variables y sus distribuciones espaciales, a la vez que físicamente más consistentes, ya que la consistencia física entre las variables viene implícita en los modelos dinámicos. Todo esto resulta en una mejor alimentación a los modelos de impacto y a los estudios climáticos. La base física de los modelos regionales climáticos ampara su uso como

herramientas de proyección cuando se trata con climas fuera del rango de las observaciones instrumentales, ya sea hacia el futuro o hacia el pasado.

En los estudios realizados se focalizan varios aspectos relevantes que deben tenerse en cuenta como son las condiciones de frontera, el tamaño de los dominios, las parametrizaciones a usar y el modo de evaluar los resultados.

Los modelos regionales climáticos corren anidados en los modelos globales, esto significa en la práctica que utilizan los valores del modelo global como condiciones de frontera de sus dominios, lo que lleva a la necesidad de resolver problemas relacionados con las diferencias de resolución espacial y temporal (Staniforth, 1997, McDonald, 1997). Estos problemas son semejantes a los que se presentan en los sistemas de predicción numérica del tiempo y en general se resuelven de la misma manera, con la creación de zonas de amortiguamiento del lado interior de las fronteras (buffer) y evitando localizar las mismas sobre áreas donde haya inhomogeneidades importantes de flujos o accidentes geográficos que influyan en el comportamiento de la atmósfera.

Los dominios de los modelos regionales deben ser lo suficientemente grandes para permitir el desarrollo de los procesos relacionados, por ejemplo con la influencia topográfica y otros de escala pequeña o media, a la vez deben ser lo suficientemente pequeños como para que las soluciones de los flujos generales no se diferencien mucho de las del modelo global conductor (Jones et al., 1995, Leduc y Laprise, 2009), esto podría generar mayores problemas en las fronteras y soluciones difíciles de interpretar, pues ya no se estaría haciendo propiamente un downscaling de los campos globales. Un aspecto importante a tener en cuenta en la definición del tamaño es que la zona de amortiguamiento en el interior de las fronteras puede ocupar una parte importante del área del dominio.

Aunque los modelos regionales climáticos operan con mucha mayor resolución que los modelos globales, estas han estado típicamente entre los 50 y 25 km con una tendencia creciente hacia el uso de 10 km, estas resoluciones no excluyen la necesidad de usar parametrizaciones para incorporar el efecto de fenómenos cuya escala es más pequeña que este tamaño de rejilla. Durante mucho tiempo se siguió el consenso de que los modelos regionales debían aplicar las mismas parametrizaciones que los modelos globales suministradores de las condiciones de frontera, pero esta práctica ha ido cambiando para permitir una mayor flexibilidad donde un mismo modelo regional pueda correr con datos de diferentes modelos globales.

Los modelos regionales incorporan las posibles desviaciones sistemáticas presentes en los modelos globales conductores a través de las fronteras y no siempre el tamaño del dominio y la resolución permiten que sean rectificadas, en estos casos se verá afectada la evaluación del modelo regional a partir de datos registrados. Por esto se recomienda hacer las evaluaciones con corridas hechas a partir de reanálisis (Christensen et al., 1997), esto facilita la evaluación en forma de series temporales, que es importante en el estudio de la variabilidad y de la efectividad en el pronóstico de eventos extremos.

En resumen puede decirse que los modelos regionales brindan un valor agregado dado por el grado de detalle que ofrecen, el volumen de información que brindan y la consistencia física entre las variables de pronóstico, pero que a la hora de su diseño e implementación debe serse cauteloso para no introducir señales espurias que pueden demeritar el resultado de las predicciones regionales con respecto a las globales.

## Modelos regionales mesoescalares de pronóstico estacional de la lluvia en el mundo.

Cómo aumentar la resolución de los modelos para representar cada vez mejor los procesos físicos de menor escala es un trabajo imprescindible, pero computacionalmente costoso, sobre todo si a medida que bajamos la escala se introducen nuevas y cada vez más complicadas parametrizaciones. Tratar de aumentar la resolución de los modelos en el área de análisis en que se desarrolla el pronóstico, es de interés para los estudios posteriores en sectores como la hidrología, la agricultura, etc. La Organización Meteorológica Mundial brinda información sobre el pronóstico estacional, haciendo “downscaling” por varias áreas de interés [[http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/wcasp/clips/outlooks/climate\\_forecasts.html](http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/wcasp/clips/outlooks/climate_forecasts.html)]. Así para el Forum de Pronóstico Climático del Caribe (CARICOF) [<http://www.cimh.edu.bb/?p=precipoutlook>] donde Cuba está involucrada se publica el pronóstico para 3 y seis meses de la precipitación y la temperatura entre otros parámetros. Este pronóstico se realiza usando las salidas de pronósticos globales y la experiencia de expertos y como herramienta se utiliza el modelo estadístico “Climate Prediction Tool” (CPT) de amplio uso a nivel mundial. En la figura 7 se muestra el pronóstico de precipitación que brinda CARICOF para el trimestre junio - agosto del 2014 dado en probabilidad por terciles. Nótese que en el área de Cuba no hay información pues los tres terciles tienen prácticamente la misma probabilidad por lo que no puede arribarse a una conclusión.

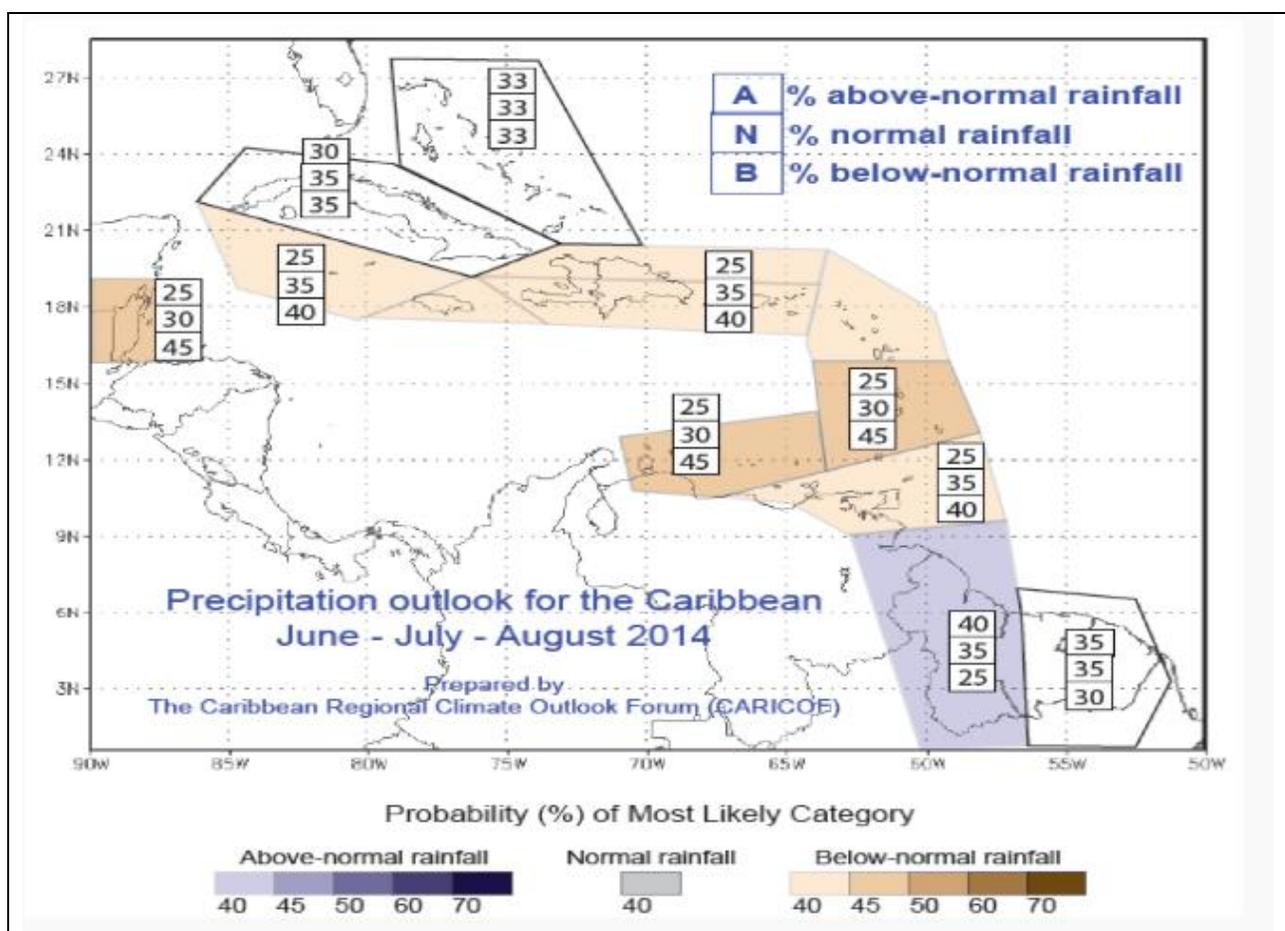


Figura 7. Pronóstico de precipitación con probabilidad por terciles para el trimestre junio - agosto del 2014 ofrecido por CARICOF

A pesar de las ventajas que pudieran aportar los modelos regionales dinámicos al desarrollo de pronósticos estacionales, su explotación operativa no es un hecho generalizado. La mayor parte de los reportes en la literatura son trabajos experimentales, los que en general llegan a conclusiones favorables sobre la contribución de los modelos regionales, pero señalan la necesidad de proseguir las investigaciones en busca de mejores resultados.

Uno de los primeros trabajos en este sentido fue el desarrollado por Fennessy y Shukla (1998) donde se anidaba un modelo regional sobre el territorio de América del Norte, Central y parte de América del Sur, en este caso el modelo era el ETA del NCEP con tamaño de rejilla de 80 kms y se trabajaba con los datos del modelo global COLA. El estudio se dividió por estaciones de invierno y verano y en general se reporta una mejora en los pronósticos de temperatura y precipitación de la rejilla anidada con respecto al modelo global.

En la actualidad se experimenta con el downscaling dinámico, con el uso de ensembles multi-modelos regionales (MRED) que se alimentan con los datos del modelo global CFSv2 y se han obtenido algunas mejorías, sobre todo con respecto al downscaling estadístico, en dependencia de la región geográfica que se trate y los modelos individuales que se escojan (Shukla & Lettenmaier, 2013).

Castro (2012) hace un experimento para probar si la modelación regional climática puede mejorar el pronóstico del llamado Monzón Norteamericano. Para ello se basa en un conjunto de "pronósticos previos" realizados con el sistema global Climate Forecast System CFS del NCEP para los años 1981 - 2004, datos de reanálisis para ese mismo intervalo y el modelo de mesoescala WRF como modelo regional. Las salidas directas del CFS no reflejan de manera significativa la presencia del monzón norteamericano, lo que se le atribuye a su baja resolución (T126), el modelo WRF se configuró con un solo dominio con tamaño de rejilla de 35 km que cubre toda el área de México y Estados Unidos. Los resultados del downscaling, aunque de manera general mejoran los del modelo global, también muestran que sólo el proceso de incluir un modelo regional no es una solución absoluta; es necesario además, que el modelo global utilizado sea capaz de reflejar correctamente las teleconexiones entre eventos conductores como El Niño y respuestas distantes, de lo contrario no se obtendrá un mejoramiento sustancial.

Dutta y colaboradores (2009) describe un experimento para simular la estación del Monzón en La India usando el modelo regional MM5 con dos dominios anidados de 90 y 30 km de tamaño de rejilla para hacer el downscaling dinámico del modelo global espectral T80L18, logrando una mejora en la distribución espacial de la precipitación, aunque no en los valores medios globales. El MM5 representó mejor también la dispersión de la lluvia y elementos sinópticos como el llamado "Jet somali" y el anticiclón tibetano, así como las regiones de convergencia.

Una comparación entre métodos de downscaling dinámicos y estadísticos para pronósticos estacionales de precipitación en España fue desarrollado por Diez y colaboradores (2005) a partir de los modelos ECMWF y UKMET, miembros del proyecto DEMETER, donde cada pronóstico consiste en un ensemble de 9 miembros. El método estadístico empleado fue el de los análogos, donde se establecen relaciones entre las variables locales y las salidas de los modelos a través de criterios de proximidad entre patrones de campos en los reanálisis y en las salidas. Como modelo regional se utilizó el Rossby Centre Climate Atmospheric Model RCA con tamaños de rejilla de 0.5 y 0.2 grados. Ambos métodos de downscaling mejoran las salidas directas de los modelos globales, aunque no se llega a una conclusión sobre el desempeño de uno con respecto al otro.

Brasil ha desarrollado también varios trabajos con respecto a la regionalización de modelos estacionales. Así Nobre y colaboradores (2001) presentaron un estudio sobre el pronóstico por downscaling de la estación lluviosa en el nordeste de Brasil utilizando como modelo

global el ECHAM3 y dos instancias del Regional Spectral Model RSM a 80 y 20 km de tamaño de rejilla. Se comparan entre si las dos variantes del modelo regional y los pronósticos del modelo global con observaciones. En este caso el modelo regional con resolución de 80 km da los mejores resultados, lo que indica que no siempre se tienen los mejores resultados utilizando mayores resoluciones.

En el trabajo "Pronóstico climático estacional para Brasil, evaluación del modelo RegCM3 anidado en el modelo global CPTEC/COLA" (Machado y Da Rocha, 2011), se describe un vasto experimento de 27 pronósticos estacionales para 3 regiones de Brasil, utilizando el modelo regional RegCM sobre un dominio que cubre casi la totalidad del continente Sudamericano con un tamaño de rejilla de 60 Km, anidado en el modelo global CPTEC/COLA con resolución T62L18. Las corridas de este modelo se hicieron para pronósticos de 4.5 meses donde se tomó la anomalía media de la temperatura superficial del mar durante los primeros 15 días y se prolongó a los 4 meses restantes, considerándose estos primeros 15 días como el período de calentamiento (spin up). Para las evaluaciones tanto del modelo global como del regional se tomaron los datos medios trimestrales de precipitación en regiones de 1 grado X 1 grado y para la temperatura a 2 m se tomaron reanálisis de NCEP con resolución de 2.5 grados X 2.5 grados. Los resultados arrojan que el modelo regional mejora en muchos aspectos los pronósticos del modelo global, entre ellos desplazamientos en tiempo y espacio de los máximos de precipitación y los errores sistemáticos (bias) en las variables. Los resultados del modelo regional también fueron comparados con medias climáticas para determinar si los pronósticos estacionales daban mejores estimaciones que las medias, lo cual se cumple mayoritariamente, sobre todo después de remover los "bias".

Chou y colaboradores (2000) presentaron un trabajo sobre el anidamiento del modelo regional ETA, del NCEP en el modelo global CPTEC/COLA (T62L28). Este es uno de los trabajos iniciales donde se definen algunas de las preocupaciones que existían en esa etapa en relación a las corridas prolongadas de modelos regionales, como la estabilidad o la posibilidad de que el modelo perdiera o ganara humedad a través de la frontera. Un criterio vigente entonces era la necesidad de reinicializar el modelo regional periódicamente. Los resultados de este trabajo mostraron no solo que se podían obtener pronósticos mejorados con respecto a los modelos globales, sino que los modelos regionales podían correr por intervalos largos sin desestabilizarse. Se hicieron corridas de 1 mes de pronósticos con resolución de 80 km para una temporada seca y una húmeda con condiciones de fronteras suministradas por CPTEC/COLA y valores de temperatura superficial del mar tomados de las observaciones en el primer día de corrida, que se propagaban a todo el período.

Posteriormente Chou y colaboradores (2005) presentaron la evaluación de un sistema de pronóstico basado en el anidamiento del modelo ETA con tamaño de rejilla de 40 km, anidado en el modelo global CPTEC CGM (T62L18) y con temperatura superficial del mar incorporada a partir de la prolongación de las anomalías al principio de las corridas. Los mayores errores en el pronóstico de la precipitación ocurrieron en el período agosto - noviembre y los menores en febrero - mayo. En general hubo una buena correspondencia entre los pronósticos y las observaciones, y elementos importantes del clima de la región, como el cinturón de convergencia intertropical, la zona de convergencia del Atlántico del Sur y la zona de convergencia del Amazonas que fueron bien representados. En la actualidad este grupo de trabajo está corriendo como downscaling el modelo ETA con resolución de 40 kms, anidado en el modelo global CPTEC acoplado con OAGCM, con pronósticos de 45 días y han comenzado a realizar los pronósticos previos (hindcast) para una evaluación del "skill".

El Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño (CIIFEN) [[www.ciifen-int.org](http://www.ciifen-int.org)] realiza un enorme esfuerzo para hacer pronósticos estacionales que involucran a varios países de América del Sur. Su downscaling es estadístico y se basa en las salidas de

los modelos globales y las bases de datos con registros de lluvia y temperatura en las estaciones meteorológicas de los países que forman parte del proyecto y emiten un boletín mensual con la información procesada. En la actualidad se está trabajando en un downscaling dinámico a partir de los modelos WRF y MM5.

Eun-Pa y colaboradores (2010) hacen una evaluación de dos métodos de post-procesamiento estadístico del modelo australiano POAMA (modelo global con resolución T47 y 17 niveles) para aumentar su efectividad en el pronóstico estacional. El primero es el método tradicional de establecer dependencias entre los campos de salida del modelo global y las variables a pronosticar a escala regional, el otro es la corrección de errores sistemáticos en las variables de salida a partir de su comparación con observaciones. Los autores proponen la constitución de un ensemble formado por las salidas directas del POAMA y las que resultan de los dos métodos estadísticos siguiendo el principio de que el desempeño de un ensemble debe ser mejor que el del mejor de los miembros. Los resultados reportados no arrojan mejoras por parte de los post-procesamientos, en el caso de la corrección de "bias" lo que se atribuye a que los valores medios climáticos no son confiables debido al corto período con el que fueron calculados, mientras que en el otro caso, las relaciones entre campos predictores y variables predictandos no resultaron lo suficientemente fuertes. Aun así, el ensemble considerado produjo mejoras en los pronósticos para varias regiones del subcontinente australiano.

Como excepción de modelos regionales usados fundamentalmente para investigación, Carrasco (2008), reporta el desarrollo de un sistema de downscaling dinámico para Chile que puede resolver las particularidades del sistema océano - cordillera andina en la predicción por 3 meses de las anomalías de temperatura y la precipitación. El método está basado en los modelos MM5 climático y el WRF y sus resultados deberán ser comparados con el pronóstico estadístico que se obtiene a través del CPT (Climate Prediction Tool). En estos momentos, los pronósticos estacionales elaborados se ofrecen en la página web de la Dirección de Meteorología de Chile que puede consultarse en línea en la dirección: [http://www.meteochile.gob.cl/prediccionestacional/prediccion\\_dinamica.html](http://www.meteochile.gob.cl/prediccionestacional/prediccion_dinamica.html).

El Research Applications Laboratory (RAL) del NCEP, en colaboración con el Institute of Biological Research, de Israel han desarrollado un sistema integrado, dinámico - estadístico, de downscaling [<http://ral.ucar.edu/projects/seasonal/>]. La tecnología está basada en un método de "k-nearest neighbour" KNN y un sistema 4-dimensional de asimilación de datos basado en el modelo WRF. Como modelo conductor se usan los pronósticos estacionales del Climate Forecast System CFS, del NCEP. Después de extensas pruebas el sistema fue transferido a las autoridades israelíes para su uso operativo en pronósticos estacionales de precipitación. Se realizaron pronósticos retrospectivos para el período de 1982-2009 utilizando reanálisis del NCEP y datos pluviométricos de 18 estaciones en la zona de interés, se obtuvieron muy buenos resultados para un número de años (1983, 2004, 2005, 2009) así como para la situación de humedad extrema de 2003, pero para otros años (1984, 1996, 1997 y 1999) estos resultados fueron no satisfactorios. De manera general el sistema incorpora información valiosa para la planificación de recursos hídricos y manejo de riesgo climático al modelo global conductor.

La bibliografía es muy amplia sobre las investigaciones en el uso de los modelos numéricos regionales mesoescalares y es materia de amplio análisis en la actualidad. De la breve descripción sobre estos modelos plasmada anteriormente, se constata que el WRF y el RegCM son usados por varios autores para lograr downscaling dinámicos y estos modelos además han sido asimilados y en el caso del WRF se encuentra en uso operativo en el Centro de Física de la Atmósfera del Instituto de Meteorología. Por estas razones aquí se

realizarán dos experiencias en la medida de los recursos computacionales que se tienen con los modelos mencionados, realizando pronósticos a largo plazo.

### **Experiencia de un pronóstico a largo plazo con el modelo RegCM.**

El modelo RegCM (Regional Climate Model) es un modelo distribuido por el International Center for Theoretical Physics (ICTP) con código de libre acceso y su descripción está dada en Pal y colaboradores (2007). Es un modelo de ecuaciones primitivas de área limitada con coordenadas sigma de presión en la vertical y que parametriza los procesos físicos de la lluvia, capa límite planetaria, interacción con la superficie y radiación, entre otros.

En Cuba se trabaja con este modelo fundamentalmente para hacer estudios de proyecciones climáticas a partir de escenarios de emisión, aunque se han realizado estudios preliminares de sensibilidad para periodos de 3 meses (Martínez et al., 2006).

Aquí se aprovechará una corrida realizada con propósitos de un estudio de sensibilidad de parametrizaciones de convección, para evaluar el desempeño del modelo para pronósticos a largo plazo.

Se utilizará el Modelo Climático Regional RegCM4.3 con 3 esquemas de cúmulos distintos "Tiedtke", "Emmanuel" y una combinación de "Grell\_Emanuel" con Grell sobre tierra y Emmanuel sobre mar. El modelo se inicializó con reanálisis ERA-Interim, a 0.5 grados de resolución horizontal, resolución temporal de 6 horas (00Z, 06Z, 12Z y 18Z) y con 37 niveles en la vertical. La temperatura superficial del mar se inicializaba cada 6 horas. El periodo de estudio analizado abarcó desde el 1ro de enero del 2000 hasta el 31 de diciembre del 2001, con un periodo de autoeducación (spin up) de 3 meses por lo que la corrida comenzó el 1ro de octubre de 1999. La variable en estudio fue la precipitación total (tpr en el modelo) que es la suma de la precipitación convectiva y la macroescalar, cada 3 horas (00Z, 03Z, 06Z, 09Z, 12Z, 15Z, 18Z y 21Z).

Para la evaluación de la corrida se utilizaron dos fuentes de información: las medias y acumulados mensuales de dos estaciones meteorológicas de superficie a saber, Casablanca (325) y Camagüey (355) y la Base de Datos del TRMM, con medias mensuales de precipitación obtenidas de las observaciones de satélite.

La rejilla utilizada para los pronósticos está definida entre los 0 y 35° de LN y los 35 y 115° de LW con un paso de 50 kms y la utilizada para las evaluaciones está definida entre los 18.78 y 24.28° de LN y entre los 73.33 y 86.08° de LW, marcando un área alrededor de Cuba y con un paso de 25 kms.

Las corridas se hicieron inicializando al principio del periodo y cada 3 y 6 meses, pero las diferencias no fueron significativas.

La lluvia total acumulada diaria para los dos años de corrida promedio en todos los puntos de rejilla, se muestra en la salida del modelo dada en la figura 8. Aquí se observa como el modelo es capaz de detectar los periodos lluvioso y poco lluvioso, aunque los valores diarios están sobreestimados y hay picos de acumulados muy altos en noviembre del 2000 y en septiembre del 2001. Se observa también la sequía interestival, pero un poco desfasada hacia el mes de junio.

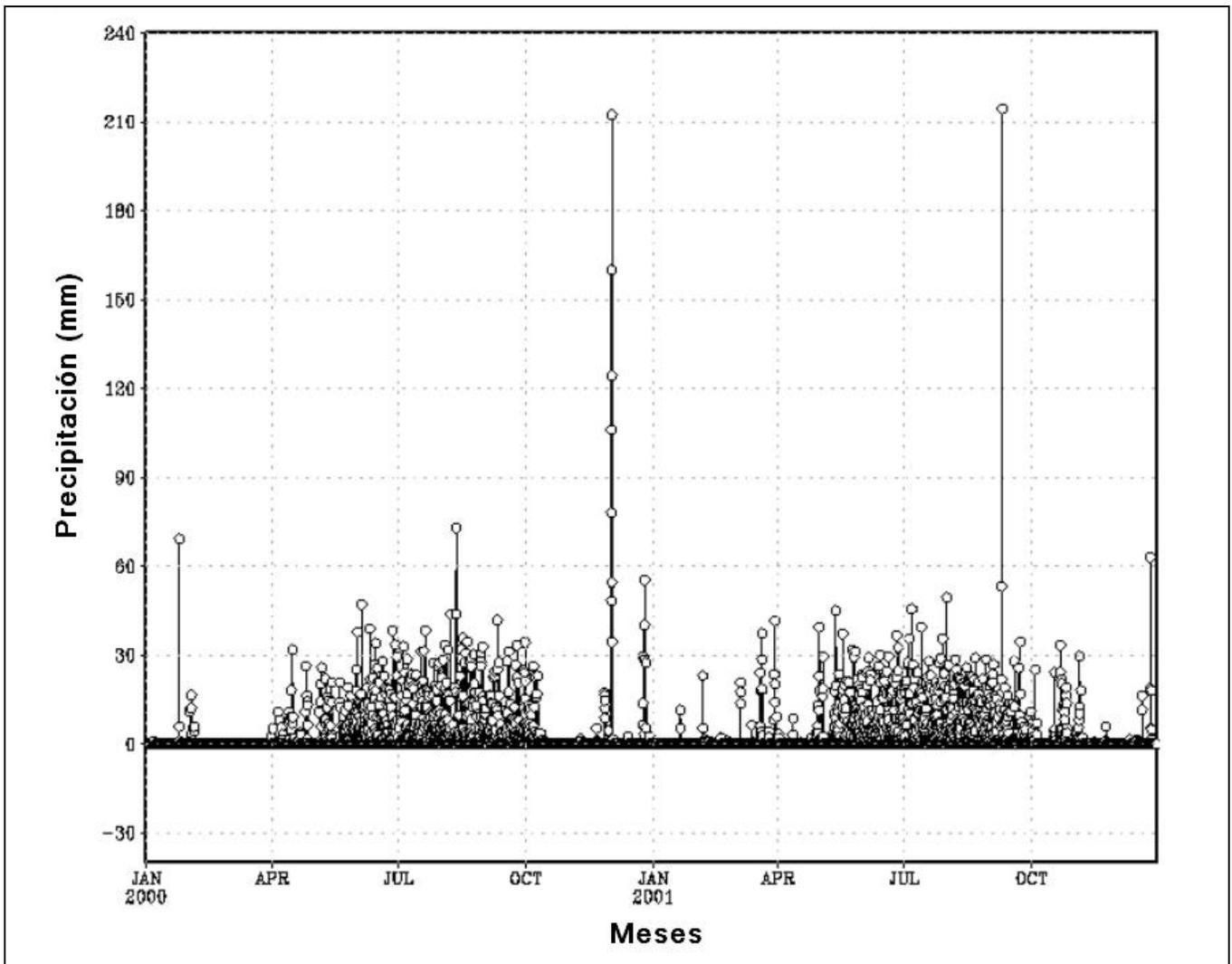


Figura 8. Pronóstico de lluvia total diaria para los años 2000 y 2001 utilizando el modelo RegCM 4.3 con la parametrización de Grell\_Emanuel y promediando los valores para todos los puntos de rejilla.

Si calculamos la precipitación promedio mensual para todos los puntos de rejilla para cada una de las parametrizaciones probadas y la comparamos con los promedios de los datos de la base TRMM, obtenemos lo que se observa en la figura 9 para el año 2000 y en la figura 10 para el año 2001.

En ambos años se ve de manera general una sobrestimación de la lluvia cuando se usan las parametrizaciones de Emmanuel (EM), Grell\_Emanuel (GE) sobre todo para el periodo lluvioso del año, sin embargo Tiedtke (TI) subestima los valores de precipitación. El error máximo entre todos los meses y parametrizaciones del año 2000 es de alrededor de 5 mm y la desviación estándar de 4.3 mm. y para el 2001 de 4.5 mm y 4.9 respectivamente.

Las correlaciones punto a punto de rejilla muestran valores bajos, entre 0.2 y 0.4 de coeficiente de correlación, con algunas excepciones como en varios meses del periodo lluvioso del 2000 para la parametrización de EM donde los valores de correlación están entre 0.4 y 0.6 y junio del 2001, donde tanto EM como GE están en ese rango.

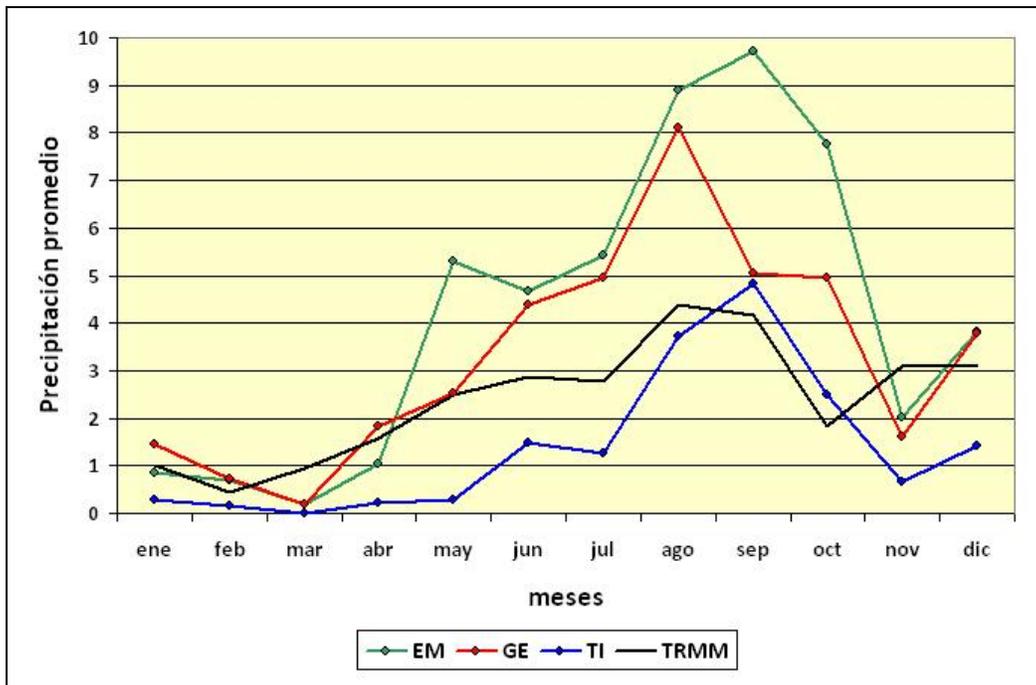


Figura 9. Precipitación promedio para todos los puntos de rejilla por cada mes del año 2000, a partir de las corridas del modelo RegCM 4.3 utilizando tres parametrizaciones diferentes: Emmanuel (EM), Grell\_Emmanuel (GE) y Tiedtke (TI) y los datos promediados de la Base del TRMM.

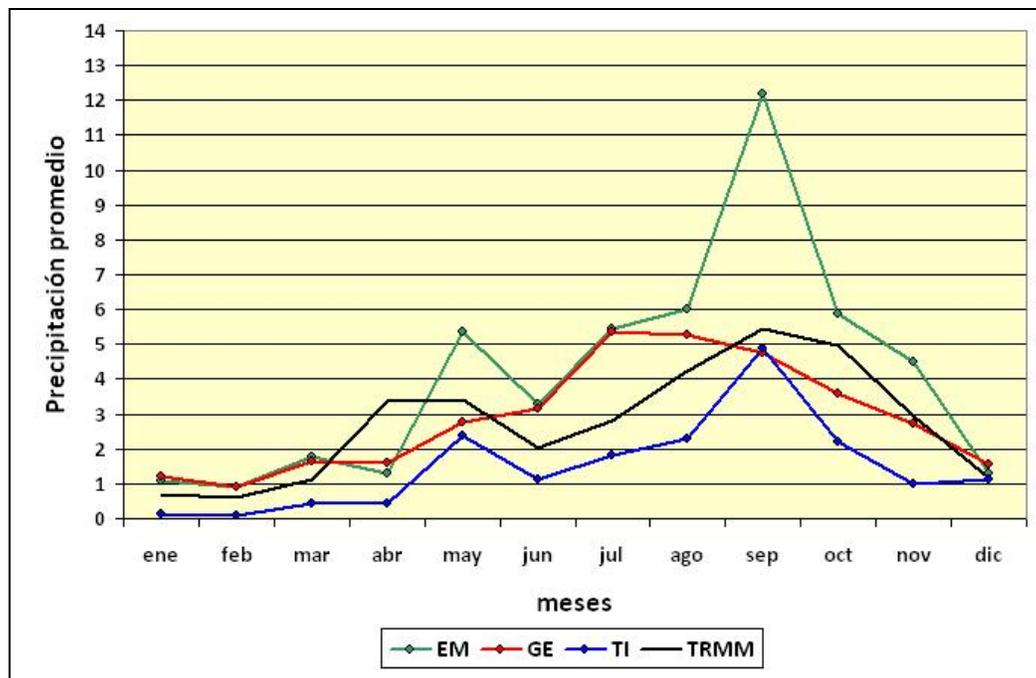


Figura 10. Precipitación promedio para todos los puntos de rejilla por cada mes del año 2001, a partir de las corridas del modelo RegCM 4.3 utilizando tres parametrizaciones diferentes: Emmanuel (EM), Grell\_Emmanuel (GE) y Tiedtke (TI) y los datos promediados de la Base del TRMM.

Una representación de la habilidad para detectar el cambio a aumentar o disminuir de un mes a otro el acumulado de lluvia pronosticado usando las tres parametrizaciones de la convección declaradas contra los cambios detectados por los datos del TRMM se representan para el año 2000 en la figura 11 y para el 2001 en la figura 12.

De estas figuras se observa que el año 2001 representa mejor el cambio y la mayoría de los desaciertos los tienen los pronósticos hechos con GE. Para el año 2000, las tres parametrizaciones tuvieron meses con desaciertos, pero en este caso el máximo lo tuvo la de Emmanuel (EM).

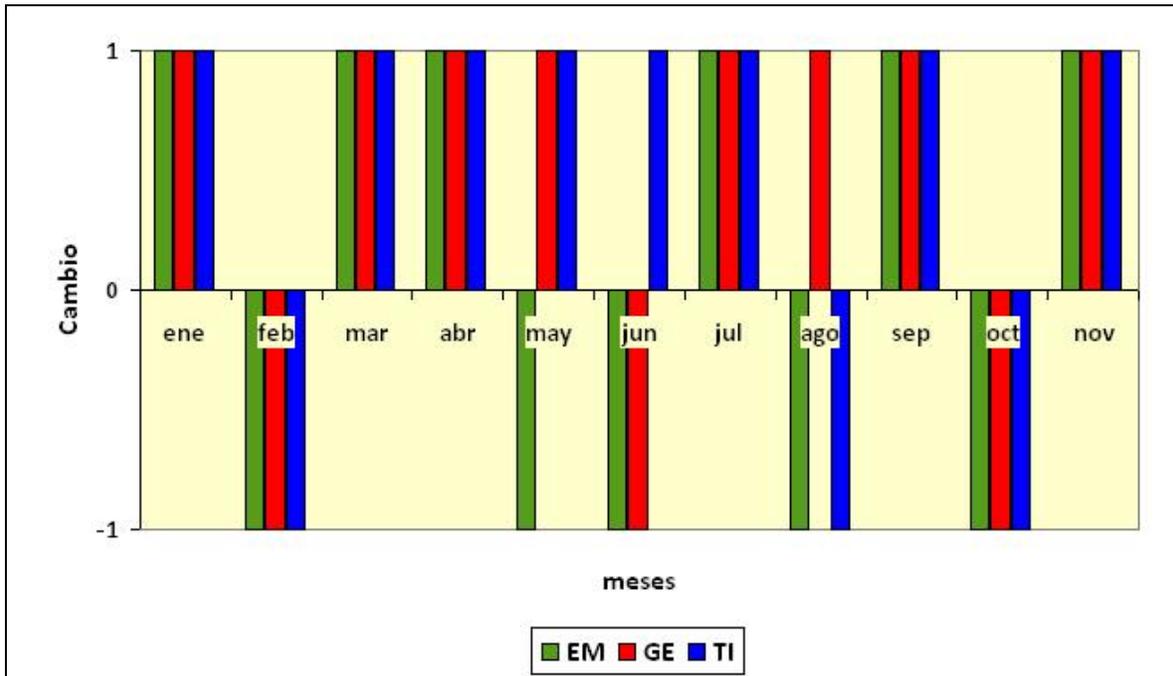


Figura 11. Cambio a aumentar o disminuir de un mes a otro el acumulado de lluvia pronosticado usando las tres parametrizaciones de la convección: Emmanuel (EM), Grell\_Emmanuel (GE) y Tiedtke (TI) contra los cambios detectados por los datos del TRMM para el año 2000.

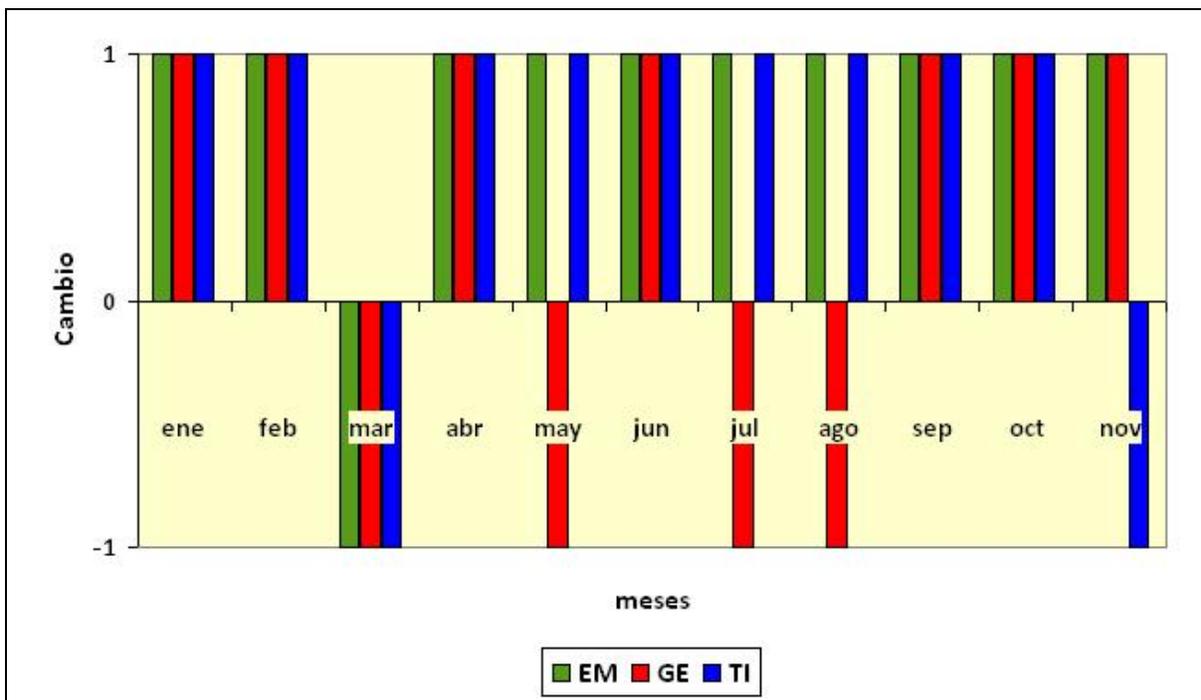


Figura 12. Cambio a aumentar o disminuir de un mes a otro el acumulado de lluvia pronosticado usando las tres parametrizaciones de la convección: Emmanuel (EM), Grell\_Emanuel (GE) y Tiedtke (TI) contra los cambios detectados por los datos del TRMM para el año 2001.

Si comparamos los valores de acumulado de precipitación pronóstico con las observaciones para las estaciones de Casablanca (325) y Camagüey (355) para el año 2001 y para dos parametrizaciones distintas de la convección, Grell\_Emanuel (GE) y Tiedtke (TI), obtenemos lo que se muestra en las figuras 13 y 14.

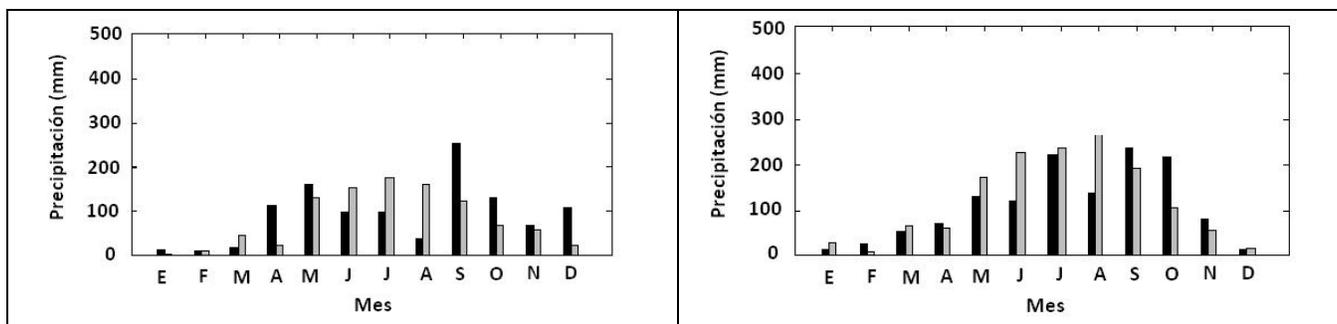


Figura 13, Comparación entre los acumulados pronosticados (barras en gris) utilizando la parametrización de Grell\_Emanuel (GE) y los acumulados mensuales observados para las estaciones de Casablanca (izquierda) y Camaguey (derecha) (barras en negro) durante el año 2001.

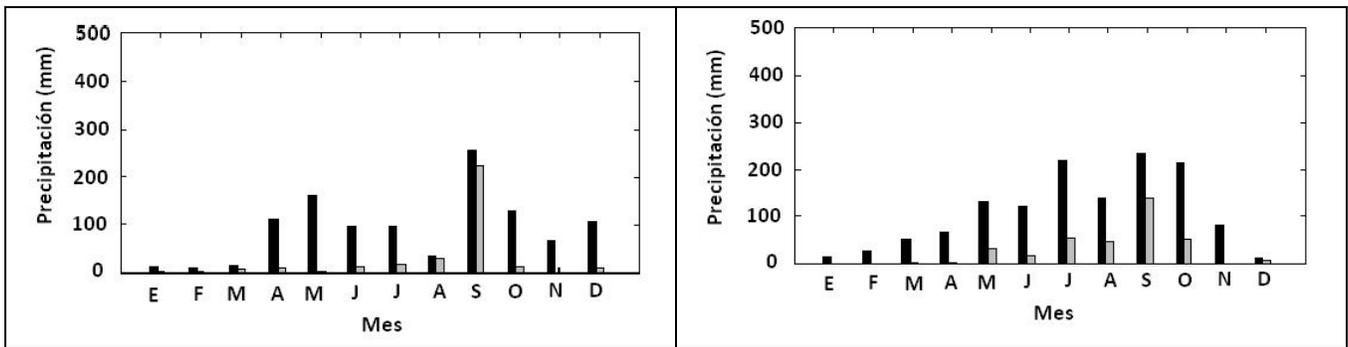


Figura 14, Comparación entre los acumulados pronosticados utilizando la parametrización de Tiedtke (TI) (barras en gris) y los acumulados mensuales observados para las estaciones de Casablanca (izquierda) y Camaguey (derecha) (barras en negro) durante el año 2001.

De las figuras se aprecia que cuando se utiliza la parametrización de Grell\_Emanuel los valores tienden en general a sobreestimarse, fundamentalmente en la temporada lluviosa en las dos estaciones, con marcada diferencia en el mes de agosto, sin embargo septiembre es subestimado tanto en Casablanca como en Camaguey.

Con la parametrización de Tiedtke la situación es opuesta, pues en general el pronóstico se queda por debajo de los acumulados observados y es sin embargo el mes de septiembre el que marca menos las diferencias para las dos estaciones.

En general puede decirse que para el experimento realizado, los valores, aunque con correlaciones bajas entre los pronosticados y los dados por la base del TRMM, están dentro de los rangos acostumbrados en este tipo de predicción. Las parametrizaciones de Emmanuel (EM) y Grell\_Emanuel (GE) tienden en general a sobreestimar los valores y Tiedtke (TI) a subestimarlos.

### Experiencia de un pronóstico a largo plazo con el modelo WRF.

El Weather Research and Forecasting Model (WRF) es un modelo desarrollado por varias instituciones de los Estados Unidos, fundamentalmente por el NCAR, la NOAA y la "Air Force Weather Agency" (AFWA), con amplio uso en el mundo y de código abierto.

Aquí se realizará un pronóstico de 15 meses de acumulados mensuales de lluvia para tres años con características diferentes e inicializando los modelos un mes antes del periodo lluvioso y uno antes del periodo poco lluvioso. Los años escogidos son el 2004 considerado un año seco, 2005, un año que comienza seco, pero con aumentos de la precipitación para la temporada lluviosa y 2008 un año donde la Isla fue afectada por tormentas tropicales y huracanes.

Para el trabajo se diseñaron dos dominios, el primero entre 8.03 y 34.03<sup>0</sup> de LN y 62.09 y 99.34<sup>0</sup> de LW para la realización del pronóstico y otro entre 18.78 y 24.28<sup>0</sup> de LN y entre los 73.33 y 86.08<sup>0</sup> de LW para la evaluación, ambos con paso de rejilla de 25 kms. La representación gráfica de los dominios se refleja en la figura 15.

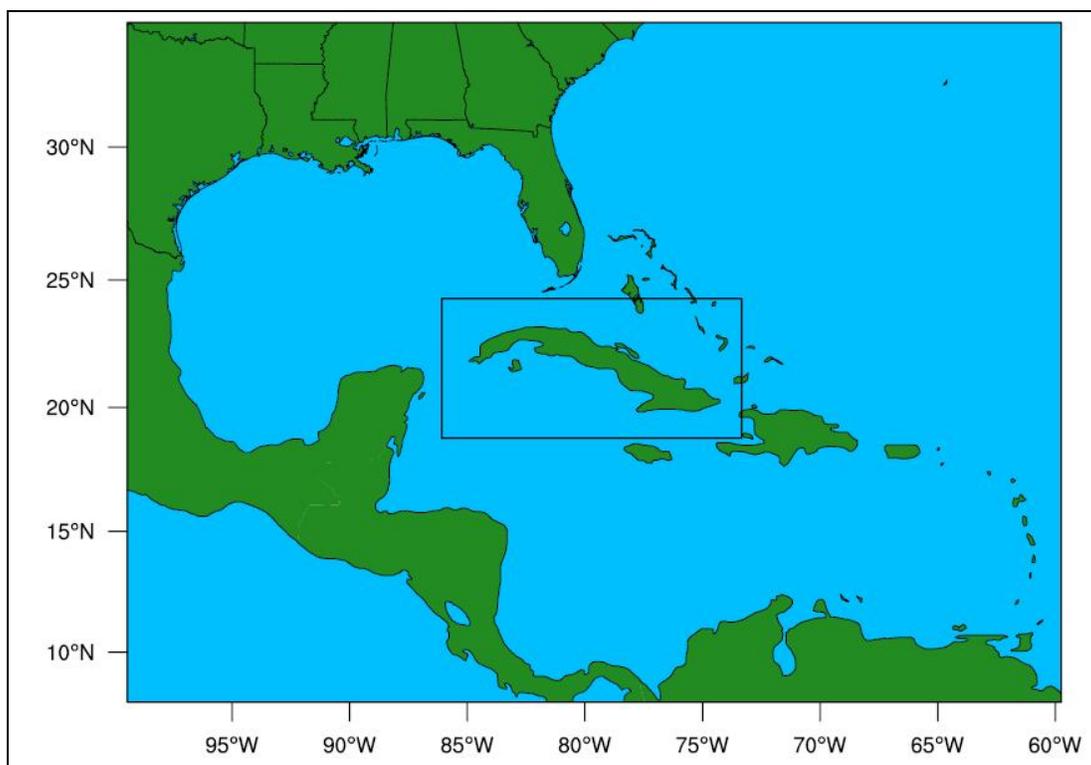


Figura 15. Representación de los dominios de corrida y evaluación para los experimentos desarrollados con WRF.

Como parametrizaciones para la lluvia se utilizaron Grell - Freitas para los cúmulos y Lin para la microfísica. Para la inicialización del modelo y la alimentación de las fronteras se usaron los datos de Reanálisis de ERA - Interim y para la comprobación de los resultados con las observaciones los datos de la Base del TRMM y los valores de acumulados mensuales de precipitación de la Red de Estaciones del INSMET y de la Red del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH).

Las fechas de inicio de los pronósticos son: 1ro de octubre del 2003, 1ro de abril del 2004, 1ro de octubre del 2004, 1ro de abril del 2005, 1ro de octubre del 2007 y 1ro de abril del 2008. Todas las corridas son de 15 meses de duración y el periodo de autoeducación (spin-up) es de un mes.

Para la evaluación dentro del dominio que encierra el área de Cuba, se distinguieron dos casos, el primero cuando se tenían en cuenta los valores en todos los puntos de rejilla y el otro cuando solo se tenían en cuenta los puntos que caían sobre tierra, esto para comparar con los valores de las estaciones de superficie dadas por el INSMET y el INRH.

La comparación entre los acumulados de lluvia promedio obtenidos para todos los puntos de la rejilla de evaluación y su comparación con los valores dados en la Base del TRMM para los pronósticos que comenzaron el 1ro de octubre se representan en la figura 16.

De esta figura se observa que la mayor discrepancia pronóstico - TRMM es para el periodo 2004 - 2005, aunque los valores pronosticados en general subestiman a los valores del TRMM. Así en el periodo 2003 - 2004 el coeficiente de correlación entre las dos curvas representadas es alto, con valor 0.97, pero la distribución espacial dada por la correlación punto a punto de la rejilla de evaluación alcanza valor máximo para el mes de febrero con un modesto 0.62 y los meses de peor desempeño son septiembre y octubre con correlaciones negativas. El error medio cuadrático promedio para todos los meses es de 52 mm.

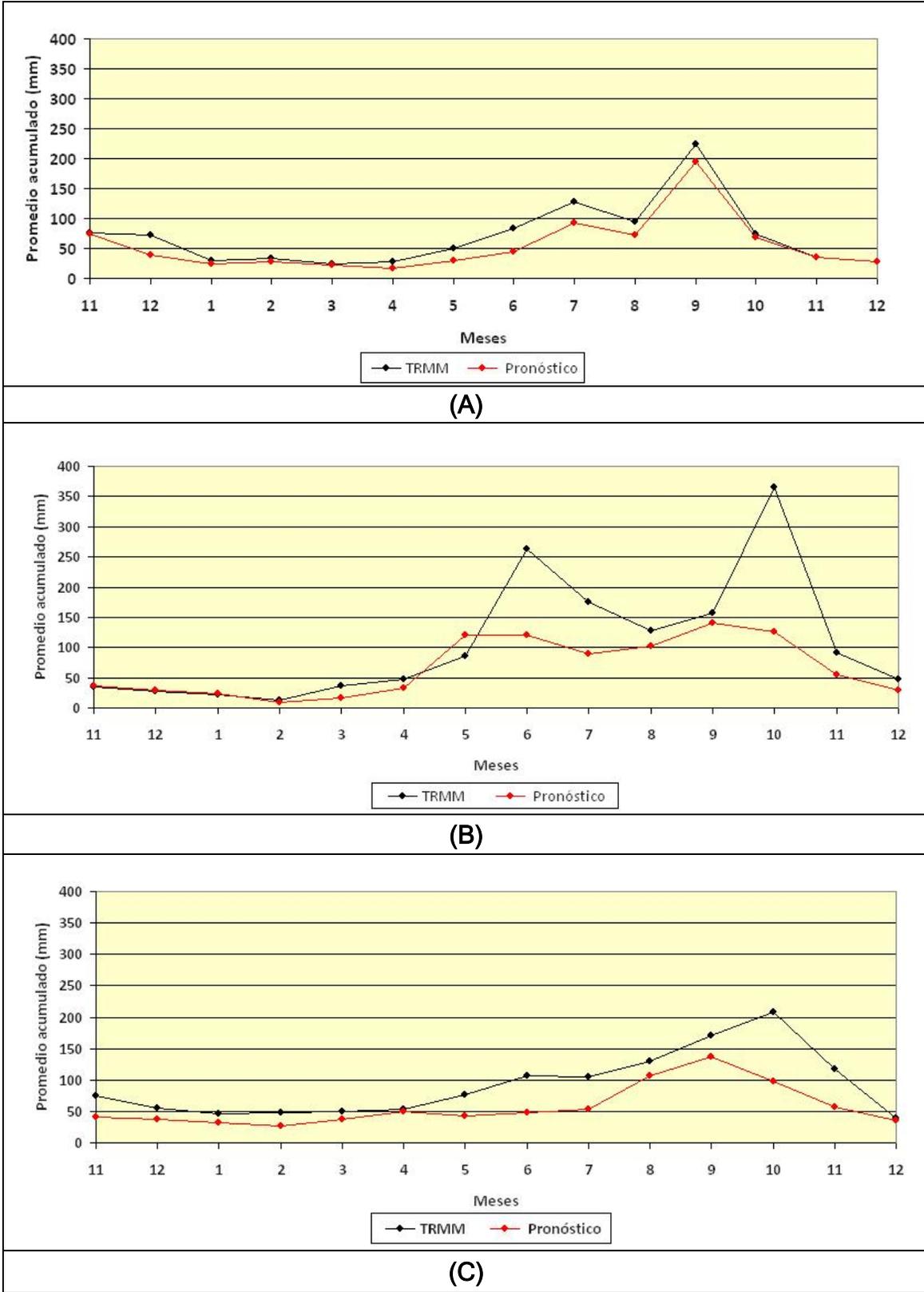


Figura 16. Acumulados promedios de lluvia mensual para los valores pronosticados y los dados por la Base del TRMM para los experimentos inicializados el 1ro de octubre donde (A) es correspondiente al periodo 2003 - 2004, (B) al 2004 - 2005 y (C) al 2007 - 2008.

El periodo 2004 - 2005 presenta el coeficiente de correlación entre las dos curvas representadas más bajo, con valor de 0.80 y la correlación punto a punto alcanza valor máximo para el mes de marzo con 0.54 y los meses de peor desempeño son mayo y septiembre con correlaciones negativas. El error medio cuadrático promedio para todos los meses es de 87 mm.

En el caso del periodo 2007 - 2008 se presenta un coeficiente de correlación entre las dos curvas representadas de 0.86 y la correlación punto a punto alcanza valor máximo para el mes de octubre con 0.54 y los meses de peor desempeño son marzo y diciembre con correlaciones de 0.01. El error medio cuadrático promedio para todos los meses es de 73 mm.

En la Tabla 10 se resumen los valores de los coeficientes de correlación trimestrales punto a punto del dominio de evaluación para los tres periodos de experimentos, en un caso con todos los puntos y en otro para todos los puntos sobre tierra. Allí se observa que no siempre los valores más altos están en los primeros estadios del pronóstico, dígase el primer trimestre. Esto podría deberse a que se están alimentando las condiciones de frontera del modelo regional mediante datos de reanálisis, lo que hace que cada seis horas las fronteras se rectifiquen con los datos “reales”, pero es presumible que cuando se usen como alimentación de fronteras un pronóstico global, la no linealidad del modelo tanto global como regional hará que mientras mayor sea el plazo mayor sea el error.

Tabla 10. Coeficientes de correlación trimestrales punto a punto del dominio de evaluación para los tres periodos de experimento inicializados el 1ro de octubre. Los valores en los recuadros son los máximos por periodos, los valores en azul son los que están entre 0.4 y 0.49, los rojos los que toman valores de 0.5 o más y el área sombreada en gris se corresponde con los trimestres del periodo poco lluvioso que da inicio a las corridas.

Trimestre	Rejilla			Tierra		
	2003-2004	2004-2005	2007-2008	2003-2004	2004-2005	2007-2008
NDE	0.49	0.48	0.41	0.40	0.30	0.37
FMA	0.46	0.38	0.27	0.35	0.57	0.60
MJJ	0.58	0.16	0.45	0.76	0.36	0.56
ASO	0.38	0.12	0.29	0.30	-0.03	0.45

Las diferencias entre las correlaciones punto a punto dependen mucho del sistema productor de lluvia presente en el mes de evaluación, así septiembre del 2004 con correlación de -0.02 estuvo marcado por la presencia del Huracán Iván. El pronóstico representó al huracan pero estimó su trayectoria por el centro de la Isla de Cuba, cuando en realidad la trayectoria se inclinó hacia el estrecho de Yucatán, esto hizo que diera acumulados notables donde la lluvia real no era mucha y viceversa por lo que la correlación fue muy mala. En la figura 17, se representa la distribución espacial del acumulado promedio en superficie para el dominio de pronostico a partir de los valores pronosticados y los del TRMM.

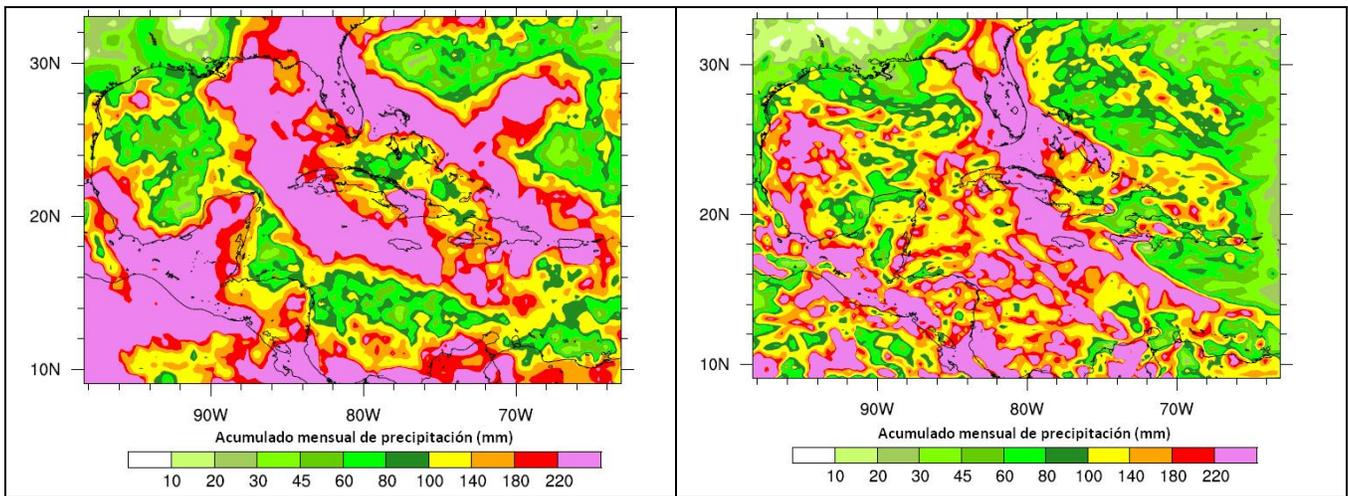


Figura 17. Distribución espacial del acumulado mensual de lluvia dado por los datos del TRMM (izquierda) y pronosticado por el WRF inicializado el 1ro de octubre del 2003 (derecha) para el mes de septiembre del 2004.

Si se hace la misma comparación para junio del 2004 donde el coeficiente de correlación alcanza el valor de 0.47 a pesar de que los acumulados son también altos, se denota (figura 18) que el pronóstico explica mejor la distribución espacial de los fenómenos productores de lluvia, que al parecer en este caso son debidas al calentamiento diurno.

Si se trabajara ahora, realizando las comparaciones solo para los puntos sobre tierra y se usa también como elemento de comparación el acumulado promedio mensual para todas las estaciones meteorológicas de Cuba y todos los pluviómetros del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos tenemos lo que se muestra en la figura 19 para cada uno de los periodos en estudio.

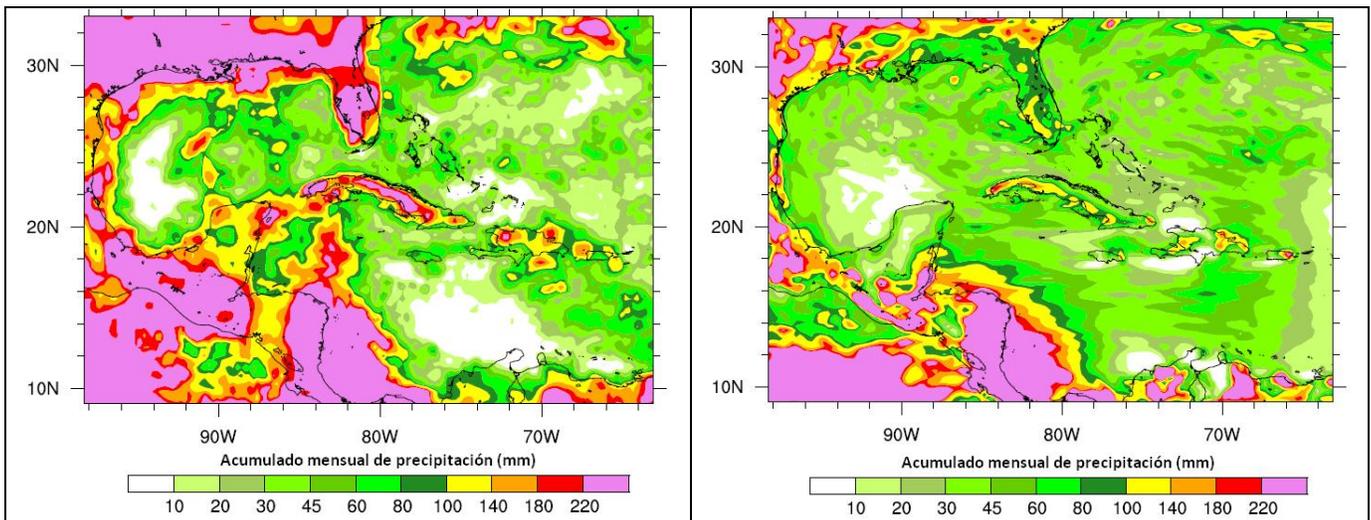


Figura 18. Distribución espacial del acumulado mensual de lluvia dado por los datos del TRMM (izquierda) y pronosticado por el WRF inicializado el 1ro de octubre del 2003 (derecha) para el mes de junio del 2004.

En la figura 19 se constata lo cercano de los valores dados por las estaciones meteorológicas y la red de Recursos Hidráulicos y para los periodos 2004 - 2005 y 2007 - 2008 con los datos del TRMM; para el periodo 2003 - 2004 estos valores son un poco diferentes. En todos los casos los valores pronosticados subestiman a los reales con la diferencia más marcada en la etapa lluviosa del periodo 2004 - 2005.

En el periodo 2003 - 2004 el coeficiente de correlación entre las curvas Pronóstico y TRMM es alto, con valor 0.90, aunque un poco menor que cuando se evaluaba toda la rejilla. La distribución espacial dada por la correlación punto a punto de la rejilla de evaluación alcanza valor máximo para el mes de junio con 0.69 y los meses de peor desempeño son noviembre y septiembre con correlaciones negativas. El error medio cuadrático promedio para todos los meses es de 56 mm.

El periodo 2004 - 2005 presenta el coeficiente de correlación entre curvas de 0.87 y la correlación punto a punto alcanza valor máximo para el mes de marzo con 0.65 y los meses de peor desempeño son enero, noviembre y diciembre con correlaciones negativas. El error medio cuadrático promedio para todos los meses es de 78 mm.

En el caso del periodo 2007 - 2008 presenta un coeficiente de correlación entre las curvas "Pronóstico" y "TRMM" de 0.96, mucho más alto que su similar para la rejilla completa y la correlación punto a punto alcanza valor máximo para el mes de mayo con 0.64 y el mes de peor desempeño es diciembre con correlación de -0.05. El error medio cuadrático promedio para todos los meses es de 78 mm.

A modo de resumen todos los coeficientes de correlación por meses para las tres corridas inicializadas el 1ro de octubre se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Coeficientes de correlación entre los valores punto a punto del pronóstico y los dados por el TRMM en el dominio de evaluación del modelo, para los tres periodos de experimento inicializados el 1ro de octubre. "R" se corresponde con todos los puntos del dominio de evaluación y "R-T" para los puntos sobre tierra del mencionado dominio.

Periodos	2003-2004		2004-2005		2007-2008	
	R	R-T	R	R-T	R	R-T
N	0.25	-0.16	0.53	0.53	0.49	0.49
D	0.54	0.07	0.46	0.41	0.34	0.32
E	0.41	0.57	0.24	-0.04	0.22	0.25
F	0.62	0.63	0.25	0.52		
M	0.31	0.20	0.54	0.65	0.01	0.14
A	0.39	0.60	0.26	0.40	0.13	0.16
M	0.25	0.42	-0.20	0.21	0.51	0.64
J	0.60	0.69	0.47	0.58	0.46	0.61
J	0.37	0.62	0.34	0.38	0.36	0.43
A	0.17	0.40	0.24	0.38	0.29	0.12
S	-0.13	-0.48	-0.02	0.06	0.15	0.04
O	-0.16	0.06	0.05	0.13	0.54	0.12
N	0.44	0.58	0.50	-0.04	0.33	0.46
D	0.37	0.22	0.17	-0.08	0.03	-0.05

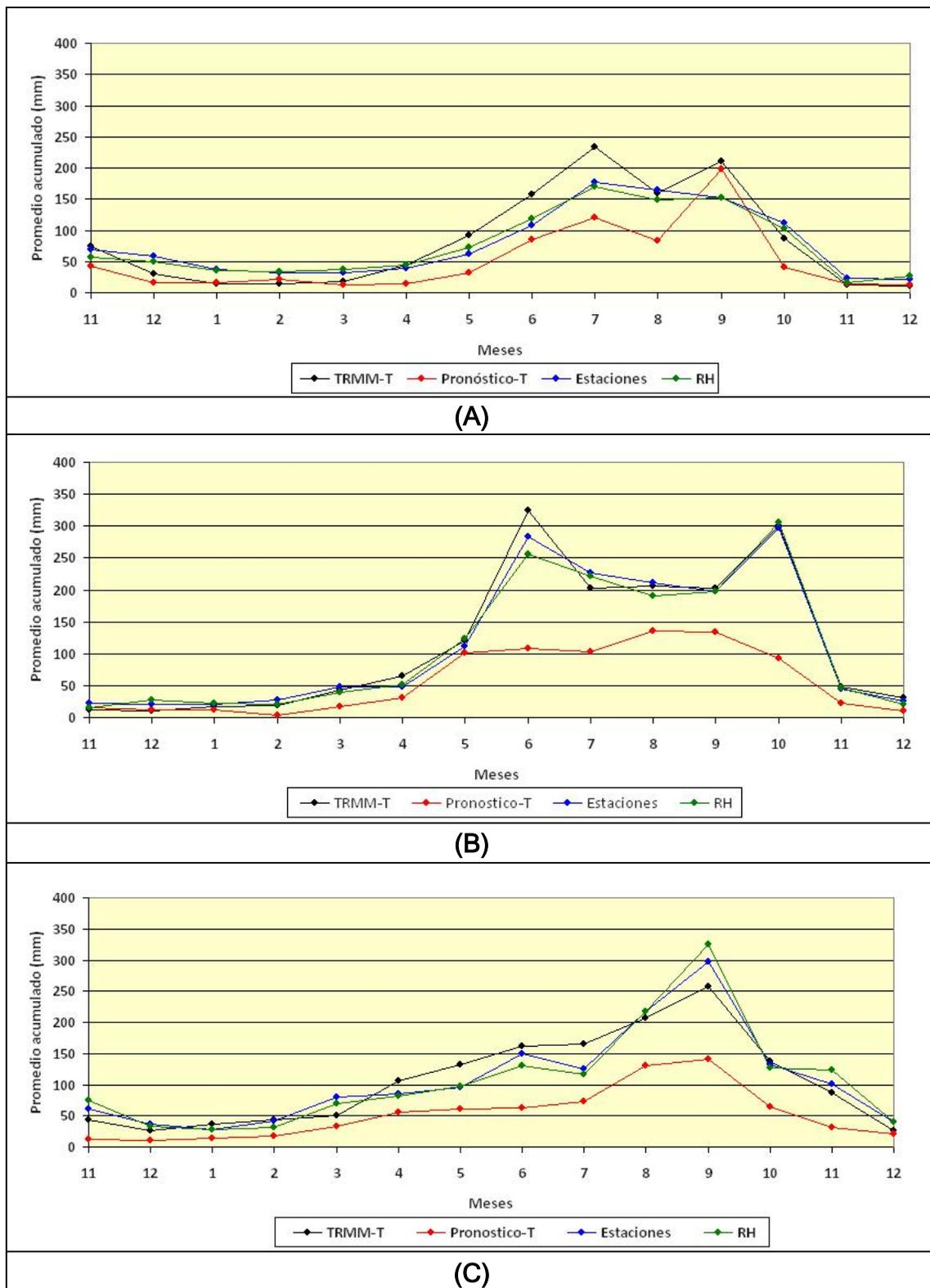


Figura 19. Acumulados promedios de lluvia mensual de los puntos sobre tierra, para los valores pronosticados, los dados por la Base del TRMM, los valores de las estaciones meteorológicas cubanas (Estaciones) y los dados por la Red del Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (RH), para los experimentos inicializados el 1ro de octubre donde (A) es correspondiente al periodo 2003 - 2004, (B) al 2004 - 2005 y (C) al 2007 - 2008.

Si evaluamos el cambio mes a mes suponiendo signo positivo si tanto el pronóstico como los datos de TRMM van en el mismo sentido y negativo si van en sentido contrario, obtenemos lo que se muestra en la figura 20.

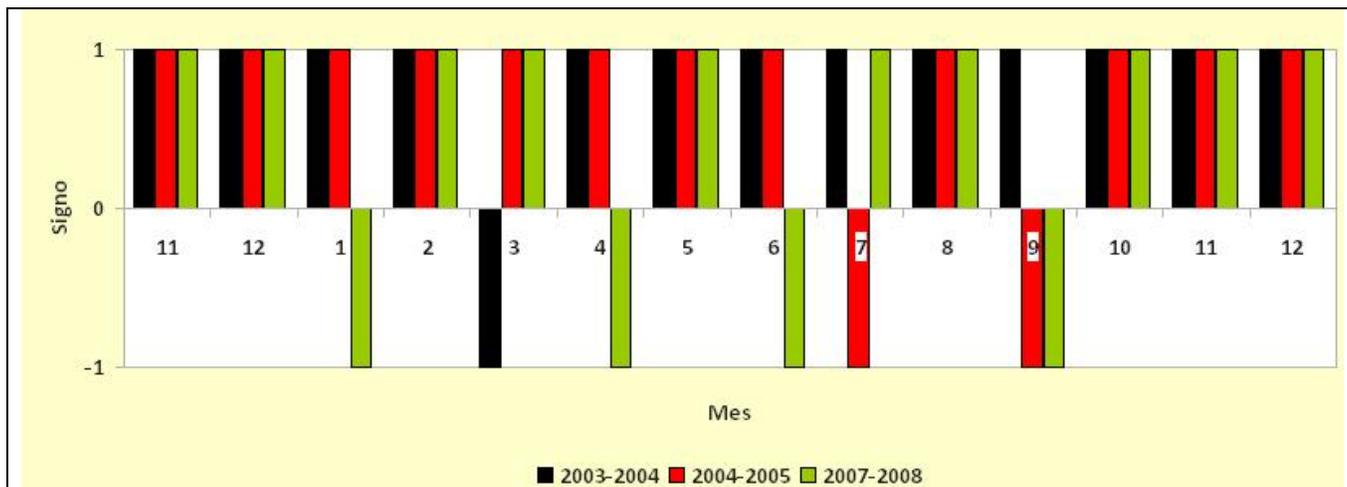


Figura 20. Evaluación del cambio mes a mes suponiendo signo positivo si tanto el pronóstico como los datos de TRMM van en el mismo sentido y negativo si van en sentido contrario para los tres periodos en estudio.

El análisis del cambio muestra que el peor desempeño está en el periodo 2007 - 2008 con 4 meses con el cambio mal pronosticado. El mes de peor resultado es septiembre, que no acertó con la tendencia para los periodos 2004 - 2005 y 2007 - 2008, periodos marcados por la ocurrencia de tormentas tropicales en el área.

Si a partir de los acumulados de las estaciones meteorológicas calculamos los terciles para la distribución de la lluvia, usando como periodo base 1983 - 2012, podemos clasificar los resultados obtenidos por el pronóstico y los valores reales según su pertenencia al “tercil bajo” (primer tercil), “tercil normal” (segundo tercil) y “tercil alto” (tercer tercil) y ver la relación que guardan en ese sentido. Para hacer una clasificación más general se consideran los porcentajes de ocurrencia de “verdaderos positivos” cuando para ambas series en comparación los valores coinciden en el mismo tercil contra el total de casos y las categorías se agruparán en dos “normal - bajo” (NB) para los terciles 1 y 2 y “normal alto” (NA) para los terciles 2 y 3. El resultado obtenido se resume en la Tabla 12.

En la mencionada Tabla se observa que el periodo con mejor desempeño fue el 2003 - 2004 que fue el más seco y cuando se evalúan los valores sobre tierra hay menor asertividad que para toda la rejilla de evaluación y en general los porcentajes de asertividad son altos, aunque debe tenerse en cuenta que los pronósticos están alimentados por reanálisis, por lo que podrían considerarse “pronósticos perfectos”.

Tabla 12. Porcientos de ocurrencia de verdaderos positivos en las categorías por terciles “normal - bajo” (NB) y “normal - alto” (NA) para tres pares de series: valores pronóstico y dados por TRMM en la rejilla completa de evaluación (T-P), valores pronóstico y dados por TRMM en los puntos sobre tierra (TT-PT) y valores pronóstico en los puntos sobre tierra y valores dados por las estaciones meteorológicas (PT-E).

Temporada	Categoría	T-P	TT-PT	PT-E
2003-2004	NB	93	79	79
	NA	100	79	71
2004-2005	NB	93	79	79
	NA	79	86	86
2007-2008	NB	86	86	86
	NA	86	71	79
promedio NB		90.6	81.3	81.3
promedio NA		88.3	78.6	78.6

Para los experimentos inicializados el 1ro de abril los resultados son similares a los inicializados el 1ro de octubre, por este motivo aquí se analizará el periodo en que coinciden los dos experimentos, es decir los periodos de mayo a diciembre de los años 2004, 2005 y 2008.

En la figura 21 se muestran los acumulados mensuales de lluvia promedio para toda la rejilla de evaluación dados por el pronóstico y la base del TRMM para el periodo en que coinciden los experimentos inicializados el 1ro de octubre y el 1ro de abril. El análisis muestra muy poca diferencia entre los pronósticos inicializados en distintas fechas, así los coeficientes de correlación entre los valores de ambos pronósticos es de 0.99 para todos los años en estudio y el error mayor es de 5 mm para el 2005. Punto a punto la diferencia mayor es en septiembre del 2008.

Con respecto a la comparación con los datos del TRMM, los valores de acumulados de lluvia son subestimados por los pronósticos y la mejor correlación se logra para el 2004 con 0.97 de coeficiente y la peor para el 2005 con 0.6, donde los meses más discordantes son junio y octubre. Si se analiza el por qué de esta diferencia podría relacionarse con la presencia de organismos tropicales que aunque no afectaron directamente al país, sus trayectorias estuvieron cerca y dentro del dominio del modelo, por ejemplo para junio el Arlene (8 - 13 de junio del 2005) que pasó próximo a la región occidental del país y para octubre el Wilma (15 - 25 de octubre del 2005). Estos organismos a diferencia del huracán Iván (figura 17), no entraron al modelo a partir de las condiciones de frontera, sino que WRF los generó como disturbios productores de lluvia, pero no con la intensidad de los organismos reales (ver figuras 22 y 23) y en otros casos no los generó. Podría pensarse que si se disminuye el dominio de trabajo, lograrían captarse más los huracanes mediante su paso por las fronteras, pero esto pegaría mucho la frontera al área de interés del pronóstico lo que introduciría ondas espúreas debido a la integración de las ecuaciones para un área limitada. Una mejora a analizar sería el aumento de la resolución en la rejilla del modelo regional para evaluar la mejor representación de las tormentas tropicales y huracanes. En el mes de junio del 2005 también se observa de los datos del TRMM acumulados importantes sobre la región central de Cuba que pudieran estar asociados a la presencia de la Vaguada Tropical Troposférica Superior (TUTT) u otras ondas presentes en el periodo, que tampoco fueron bien representadas en el pronóstico.

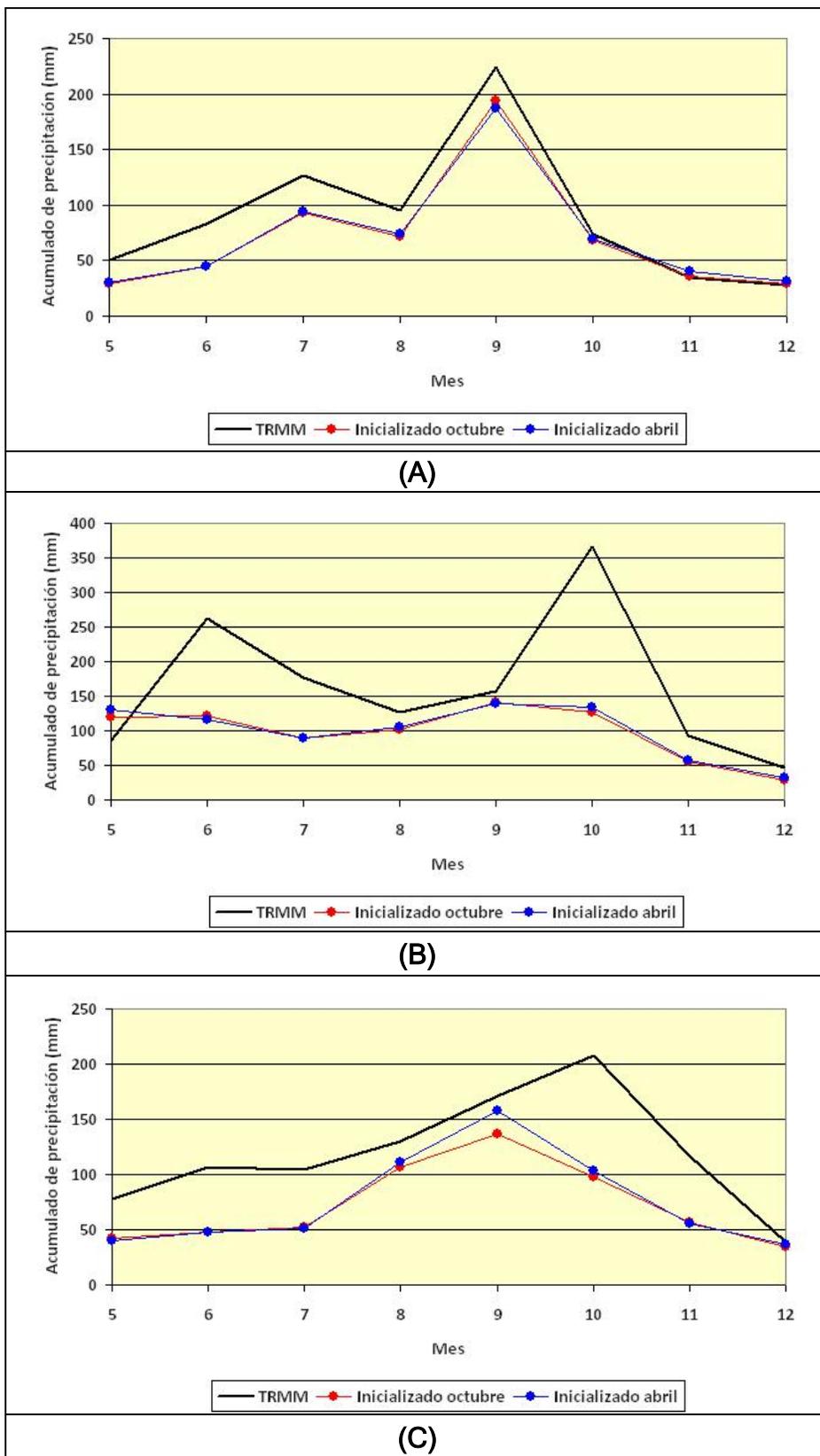


Figura 21. Acumulados promedios de lluvia mensual para los valores pronosticados en el periodo en que coinciden los inicializados el 1ro de octubre y el 1ro de abril y los dados por la Base del TRMM, donde (A) corresponde al año 2004, (B) al 2005 y (C) al 2008.

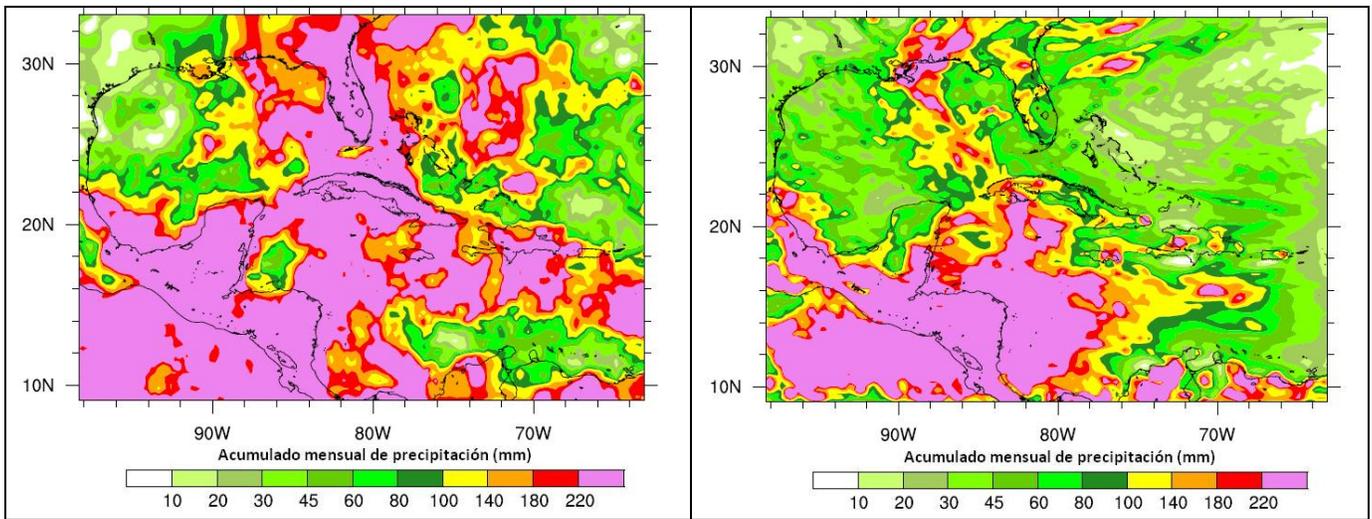


Figura 22. Distribución espacial del acumulado mensual de lluvia dado por los datos del TRMM (izquierda) y pronosticado por el WRF inicializado el 1ro de octubre del 2004 (derecha) para el mes de junio del 2005.

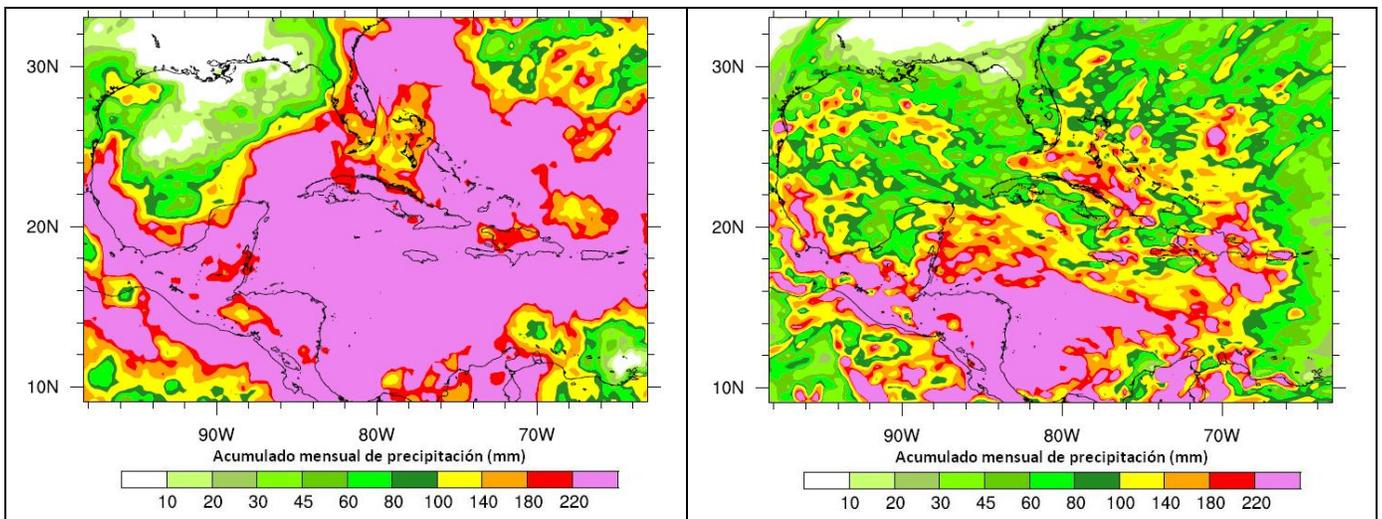


Figura 23. Distribución espacial del acumulado mensual de lluvia dado por los datos del TRMM (izquierda) y pronosticado por el WRF inicializado el 1ro de octubre del 2004 (derecha) para el mes de octubre del 2005.

Si se analiza septiembre del 2008 que es mes con mayor diferencia en los acumulados para el pronóstico con las dos inicializaciones, de los mapas de distribución espacial del acumulado de precipitación se observa que los mismos son bastante parecidos (ver figura 24), excepto hacia la región central de la Isla de Cuba, pues el inicializado el 1ro de octubre del 2007 muestra valores muchos más bajos en sus acumulados que el inicializado el 1ro de abril del 2005. Esto pudiera estar relacionado con los efectos de la no linealidad del modelo con pronósticos a largo plazo, ya que las diferencias fundamentales están dadas hacia el centro del dominio de integración, donde es muy escasa la influencia de las fronteras aportadas por los reanálisis. Si se corriera entonces el modelo con los datos de un modelo

global, las diferencias podrían ser marcadas en todo el dominio y sobre todo en el centro del mismo, que es el área de mayor interés de estudio, por lo que se impone el desarrollo de ensembles para amortiguar la variación.

Un caso similar que también se distingue se da para mayo del 2005 con los mismos efectos.

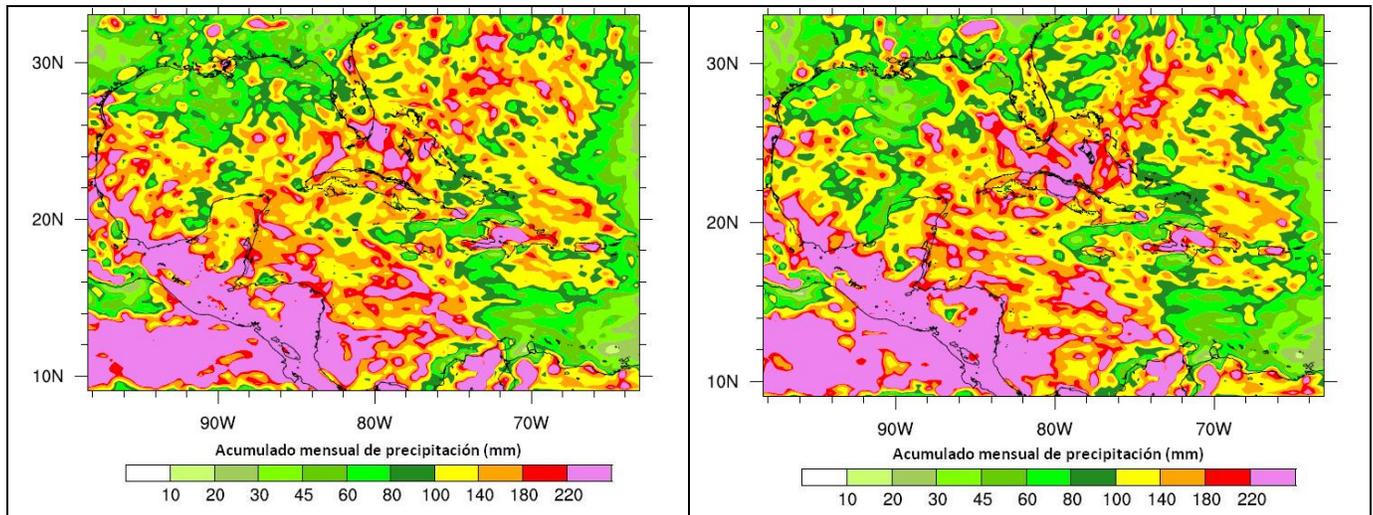


Figura 24. Distribución espacial del acumulado mensual de lluvia pronosticado por el WRF para el mes de septiembre del 2008, inicializado el 1ro de octubre del 2007 (izquierda) e inicializado el 1ro de abril del 2008 (derecha).

Cuando se evalúa la coincidencia de los valores entre los dos pronósticos inicializados con diferentes fechas para los puntos que están sobre tierra, el comportamiento es muy similar al de cuando se toman todos los puntos. Las correlaciones entre los dos pronósticos varían entre 0.96 y 0.99 y las correlaciones entre los pronósticos y los datos de TRMM presentan en algunos casos mejor y en otros peor correlación con respecto a cuando se trabaja con todos los puntos del dominio de evaluación, con 0.87 para el 2004, 0.62 para el 2005 y 0.95 para el 2008.

En general podría decirse que el “downscaling” dinámico basado en el uso del modelo WRF es un recurso válido para el pronóstico estacional ya que los valores obtenidos de los experimentos realizados están en rangos similares a los reportados por la literatura para estos casos, a pesar de ser Cuba una Isla larga y estrecha, de encontrarse casi al límite del trópico y afectada por sistemas productores de lluvia típicos de diferentes latitudes y por tormentas tropicales y huracanes que pueden constituir sistemas singlares para este tipo de pronóstico.

## **Factibilidad para la asimilación e implementación de modelos numéricos para el pronóstico estacional de la lluvia.**

Una vez analizados los tópicos anteriores pueden entonces responderse las preguntas expresadas en la introducción del presente informe. Quedaría responder la pregunta:

¿Qué puede recomendarse sobre el establecimiento de un pronóstico estacional de la lluvia para Cuba y qué líneas de trabajo futuro podrían establecerse?.

La respuesta es que si puede establecerse un pronóstico dinámico estacional de la lluvia para Cuba con la ayuda de un modelo regional mesoescalar, como pueden ser WRF, RegCM y MM5, aunque sin estudios de sensibilidad y correcta implementación, los resultados pueden ser limitados y poco útiles. Para la correcta implementación de un pronóstico dinámico estacional serían imprescindibles los siguientes requerimientos:

1. La capacitación de Recursos Humanos en la materia. Dado que no hay antecedentes en esta línea de trabajo en el INSMET, que la temática es punto de discusión a nivel mundial y que el volumen de información es demasiado grande se hace necesaria la formación de personal en implementación de modelos, estudios de sensibilidad y evaluación.
2. Suficiente capacidad de computo para los experimentos y puesta operativa del o de los modelos.
3. Obtención de los datos de modelos globales para la alimentación del modelo regional. Aquí habría que garantizar dos puntos, el primero referido al establecimiento de relaciones con otros centros que garanticen la obtención de los datos de forma segura y permanente y el segundo referido al nivel de conectividad del INSMET para poder ingresar datos o salidas de corridas hechas en centros externos. Hay varios Centros que podrían ser considerados para la colaboración como el CPTEC de Brasil, el CIIFEN en Ecuador o ICPT en Italia. Pronósticos del modelo CFSv2 de NCEP están disponibles y libres en la dirección [<http://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/cfs/prod/>] pero se necesita un alto nivel de conectividad para adquirirlos, sobre todo si se tiene en cuenta que al menos es necesario tener la información de 6 meses actualizada cada mes.
4. Suficiente capacidad de almacenamiento. Como es lógico datos de 6 meses, cada 6 horas de un modelo global, para varias variables puede representar un volumen importante de información con la que hay que trabajar de forma fluida por lo que se requiere tenerla disponible para la entrada / salida.

Se podría en primera instancia basar el pronóstico directamente en los modelos globales, pero aún así su implementación llevaría estudios de sensibilidad y evaluación para Cuba y habría que garantizar la disponibilidad de los datos. Además la falta de detalle de los modelos globales puede constituir información poco útil para sectores como la hidrología y la agricultura, que son los clientes principales de este tipo de servicio.

Si se asume la tarea de implementar un modelo de pronóstico estacional de la lluvia para Cuba, se recomiendan como principales líneas de trabajo las siguientes:

- Seleccionar el o los modelos regionales con los que podría trabajarse.
- Hacer estudios de sensibilidad de los modelos, basados en parametrizaciones de la convección, resolución de la rejilla, tamaño del dominio y condiciones de tipo - uso de suelo.
- Hacer estudios de evaluación sobre la conformación de "ensembles" para acotar la no linealidad de los modelos de pronóstico a largo plazo con distintas condiciones iniciales (reducción del caos), distintas parametrizaciones (reducción del desorden) y distintos modelos (multi-modelos) (reducción del ruido).
- Evaluar la predictibilidad de los fenómenos productores de lluvia en Cuba y su papel dentro de los resultados del pronóstico.

- Seleccionar uno o varios modelos globales para la obtención de información de pronóstico con la que alimentar el modelo regional y desarrollar los mecanismos que permitan el flujo correcto de esta información.
- Desarrollar sistemas para la evaluación del pronóstico.
- Establecer un sistema operativo de pronóstico estacional y evaluar sus resultados como parte del mismo sistema. A partir de este establecimiento realizar las corridas de pronósticos previos (hindcast) para poder evaluar después de un periodo largo de operación el desempeño del modelo (skill).

## Referencias

- Adler, RF, Huffman, G, Chang, A, Ferraro, R, Xie, P, Janowiak, J, Rudolf, B, Schneider, U, Curtis, S, Bolvin, D, Gruber, A, Susskind, J, Arkin, P 2003, 'The version 2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present)', *Journal of Hydrometeorology*, vol. 4, pp. 1147-1167
- Álvarez, L., Borrajero, I, Álvarez, R, Rivero, I, Carnesoltas, M, Aenlle, L, Novo, S, Iraola, C, Rojas, Y, Bárcenas, M, Hernández, M 2010, 'Actualización de la distribución espacial de las tormentas eléctricas en Cuba', *Informe final de Resultado Científico*, UDICT, Instituto de Meteorología, 114 pp.
- Arora, V, Scinocca, J, Boer, G, Christian, J, Denman, KL, Flato, G, Kharin, V, Lee, W, Merryfield, W 2011, 'Carbon emission limits required to satisfy future representative concentration pathways of greenhouse gases', *Geophys. Res. Lett.*, vol. 38, L05805, doi:10.1029/2010GL046270
- Arribas, A, Glover, M, Maidens, A, Peterson, K, Gordon, M, MacLachlan, C, Graham, R, Fereday, D, Camp, J, Scaife, AA, Xavier, P, McLean, P, Colman, A, Cusack, S 2011, 'The GloSea4 Ensemble Prediction System for Seasonal Forecasting', *Monthly Weather Review*, vol. 139, no. 6, pp. 1891-1910, doi: 10.1175/2010MWR3615.1.
- Bessafi, M & Wheeler, MC 2006, 'Modulation of South Indian Ocean tropical cyclones by the Madden-Julian oscillation and convectively coupled equatorial waves', *Mon. Wea. Rev.*, vol. 134, pp. 638-656.
- Cárdenas, PA, Centella, A, Naranjo, LR 1995, 'Pronósticos mensuales de totales de lluvia y temperaturas extremas en Cuba', *Informe Científico - Técnico*, IDICT, Instituto de Meteorología, 77 pp.
- Cárdenas, PA 1998, 'Papel de índices teleconectivos y del ENOS en la predictabilidad de la lluvia en Cuba', *Boletín de SOMETCUBA*, vol. 4, no. 2, publicación en línea, <[http://www.met.inf.cu/sometcuba/boletin/v04\\_n02/espanol/ab\\_art4.htm](http://www.met.inf.cu/sometcuba/boletin/v04_n02/espanol/ab_art4.htm)>
- Cárdenas, PA 1999, 'Pronóstico de totales mensuales de lluvia en Cuba. Un modelo con varios meses de adelanto', *Revista Cubana de Meteorología*, vol. 6, no. 1, pp. 47-51.
- Carrasco, J 2008, 'Implementation of a regional model for climate prediction in Chile', *APEC Climate Symposium*, Lima, Peru, 19-21 August 2008, consulta en línea <[http://publications.apec.org/publication-detail.php?pub\\_id=293](http://publications.apec.org/publication-detail.php?pub_id=293)>

Castro, CL 2012, 'Can a Regional Climate Model Improve the Ability to Forecast the North American Monsoon?', *US National Oceanic and Atmospheric Administration Climate Test Bed Joint Seminar Series NCEP*, Camp Springs, Maryland, 19 March 2012.

Cavalcanti, IFA., Marengo, JA., Satyamurty, P, Nobre, CA., Trosnikov, I, Bonatti, JP , Manzi, AO, Tarasova, T, Pezzi, LP, D'Almeida, C, Sampaio, G, Castro, CC, Sanches, MB, Camargo, H 2002, 'Global climatological features in a simulation using the CPTEC-COLA AGCM', *J. of Climate*, vol. 15, pp. 2965-2988, doi: 10.1175/1520-0442(2002)015<2965:GCFIAS>2.0.CO;2

Coelho, CAS, Stephenson, DB, Balmaseda, M, Doblas-Reyes, FJ, Van Oldenborgh, GJ 2005, 'Towards an integrated seasonal forecasting system for South America', *ECMWF Technical Memorandum*, no. 461, 26pp.

Chen, M, Wang, W, Kumar 2010, 'Prediction of Monthly-Mean Temperature: The Roles of Atmospheric and Land Initial Conditions and Sea Surface Temperature', *J Climate*, vol. 23, pp. 717-726.

Chen, M, Wang, W, Kumar, A, Wang, H, Jha, B 2012, 'Ocean surface impacts on the seasonal precipitation over the tropical Indian Ocean', *J. Climate*, vol. 25 , no. 10 , pp. 3566-3582, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00318.1.

Chou, SC, Nunes, AM, Cavalcanti, IFA 2000, 'Extended Range forecasts over South America using the regional Eta model', *Journal of Geophysical Research*, vol. 105, no. D8, pp. 10147-10160.

Chou, SC, Bustamante, JF, Gomes, JL 2005, 'Evaluation of Eta Model seasonal precipitation forecasts over South America', *Nonlinear Processes in Geophysics*, vol. 12, pp. 537-555.

Christensen, JH, Machenhauer, B, Jones RG, Schar, C, Ruti, PM, et al. 1997, 'Validation of present-day regional climate simulations over Europe: LAM simulations with observed boundary conditions', *Clim. Dyn.*, vol. 13, pp. 489-506.

Deque, M, Jones, RG, Wild, M, Giorgi, G, Christensen JH, Hassell, DC, Vidale, PL, Rockel, B, Jacob, D, Kjellstrom, E, de Castro, M, Kucharski, F, van den Hurí, B 2005, 'Global high resolution versus Limited Area Model climate change projections over Europe: quantifying confidence level from PRUDENCE results', *Clim. Dyn.*, vol. 25, pp. 653-670, doi: 10.1007/s00382-005-0052-1.

Diez, E, Primo, C, García-Moya, JA, Gutiérrez, JM, Orfila, B 2005, 'Statistical and dynamical downscaling of precipitation over Spain from DEMETER seasonal forecasts', *Tellus*, vol. 57A, pp. 409-423

Dutta, S, Das, Kar, SC, Mohanty, UC, Joshi, PC 2009, 'Impact of Downscaling on the Simulation of Seasonal Monsoon Rainfall Over the Indian Region Using a Global and Mesoscale Model', *The Open Atmospheric Science Journal*, vol. 3, pp. 104 - 123.

- Eun-Pa, L, Harry, H, Hendon, David, LT, Anderson, AC, Alves, O 2010, 'Dynamical, Statistical-Dynamical, and Multimodel Ensemble Forecasts of Australian Spring Season Rainfall September 2010', *Monthly Weather Review*, vol. 139, pp. 958 - 974.
- Fennessy, MJ & Shukla, J 1998, 'Seasonal Prediction Experiment with Regional Model Nested in a Global Model', *COLA Technical Report no. 63*, Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies, Calverton, USA, 54 pp.
- Feser, F 2006, 'Enhanced detectability of added value in limited-area model results separated into different spatial scales', *Mon Wea Rev*, vol. 134, pp. 2180-2190, doi:10.1175/MWR3183.1.
- Fu, X, Wang, B, Lee, JY, Wang, W, Gao L 2011, 'Sensitivity of dynamical intraseasonal prediction skills to different initial conditions', *Mon. Wea. Rev.*, vol. 139, pp. 2572-2592.
- Gilleland, E, Ahijevych, D, Brown, BG, Casati, B, Ebert, E 2009, 'Intercomparison of spatial forecast verification methods', *Weather and Forecasting*, vol. 24, pp. 1416-1430.
- Giorgi, F, Diffenbaugh, NS, Gao, XJ, Coppola, E, Dash SK, et al. 2008, 'The regional climate change hyper-matrix framework', *Eos Trans*, vol. 89, pp. 445-446.
- Giorgi, F, Jones, C, Asrar, G, 2009, 'Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework', *WMO Bulletin*, vol. 58, no. 3, pp. 175-183.
- González, C 1999, 'Climatología de los frentes fríos que han afectado a Cuba desde 1916-1917 hasta 1996-1997', *Revista Cubana de Meteorología*, vol. 6, no.1, pp. 15-19.
- Griffies, SM, Gnanadesikan, A., Dixon, KW, Dunne, JP, Verdes, R, Harrison, MJ, Rosati, A, Russell, J, Samuels, BL, Spelman, MJ, Winton, M, Zhang, R 2005, 'Formulation of an ocean model for global climate simulations', *Ocean Science*, vol. 1, pp. 45-79, doi:10.5194/os-1-45-2005.
- Grotch, SL, MacCracken, MC 1991, 'The use of general circulation models to predict regional climatic change', *J of Climate*, vol. 4, pp. 286-303.
- Herrera S. 2011, 'Desarrollo, validación y aplicaciones de Spain02: Una rejilla de alta resolución de observaciones interpoladas para precipitación y temperatura en España', Tesis de Doctorado en Matemáticas y Computación, Universidad de Cantabria, Santander, España, [http://www.meteo.unican.es/files/pdfs/2011\\_Tesis\\_Herrera\\_small.pdf](http://www.meteo.unican.es/files/pdfs/2011_Tesis_Herrera_small.pdf)
- Huffman, G J 1997, 'Estimates of root-mean-square random error for finite samples of estimated precipitation', *J. Appl. Meteor.*, vol. 36, no. 9, pp.1191- 1201.
- Huffman, GJ, Adler, RF, Arkin, P, Chang, A, Ferraro, R, Janowiak, AGJ, McNab, A, Rudolf, B, Schneider, U 1997, 'The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) combined precipitation dataset', *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 78, pp. 5- 20.
- Jin, EK, Kinter III, JL., Wang, B y colaboradores 2008, 'Current status of ENSO prediction skill in coupled ocean-atmosphere model', *Clim. Dyn.*, vol. 31, pp.647-664.

Jones, RG, Murphy, JM, Noguer M 1995, 'Simulation of climate change over Europe using a nested regional climate model. I: assessment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries', *Quart J R Met Soc*, vol. 121, pp. 1413-1449.

Koster, RD, Mahanama, SP, Yamada, TJ, Balsamo, G, Berg, AA, Boisserie, M, Dirmeyer, PA, Doblas-Reyes, FJ, Drewitt, G, Gordon, CT, Guo, Z, Jeong, J, Lawrence, DM, Lee, W., Li, Z, Luo, L, Malyshev, S, Merryfield, WJ, Seneviratne, SI, Stanelle, T, Van den Hurk, BJ, Vitart, F, Wood, EF 2010, 'Contribution of land surface initialization to subseasonal forecast skill: First results from a multi-model experiment', *Geophysical Research Letters*, vol. 37, L02402, doi: 10.1029/2009GL041677.

Kuroda, Y 2008, 'Role of the stratosphere on the predictability of medium-range weather forecast. A case study of winter 2003-2004', *Geophys. Res. Letters*, vol. 35, L19701, doi:10.1029/2008GL034902

Landman, WA, Kgatuke, M-J, Mbedzi, M, Beraki, A., Bartman, A, du Piesanie, A. 2008, 'Performance comparison of some dynamical and empirical downscaling methods for South Africa from a seasonal climate modelling perspective', *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.1766.

Lecha, LB, Paz, LR, Lapinel, B [editores] 1994, *El Clima de Cuba*, Editorial Academia, La Habana, 186 pp.

Leduc, M, Laprise, R 2009, 'Regional climate model sensitivity to domain size', *Clim Dyn.*, vol. 32, pp. 833-854, doi:10.1007/s00382-008-0400-z.

Machado, RD, Da Rocha, RP 2011, 'Previsões Climáticas Sazonais Sobre O Brasil: Avaliação Do REGCM3 aninhado no modelo global CPTEC/COLA', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol.26, no.1, pp. 121 - 136.

Marengo, JA., Cavalcanti, IFA., Satyamurty, P, Trosnikov, I, Nobre, CA., Bonatti, JP, Camargo, H, Sampaio, G, Sanches, MB, Manzi, AO, Castro, CC, D'Almeida, C, Pezzi, LP, Candido, L 2003, 'Assessment of regional seasonal rainfall predictability using the CPTEC/COLA atmospheric GCM', *Climate Dyn.*, vol. 21, pp. 459-475.

Martinez-Castro, D, Rocha, RP da, Bezanilla-Morlot, A, Álvarez-Escudero, L, Reyes-Fernández, JP, Silva-Vidal, Y, Arritt, RW 2006, 'Sensitivity studies of the RegCM3 simulation of summer precipitation, temperature and local wind field in the Caribbean Region', *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 86, no. 1-4, pp. 5-22, DOI: 10.1007/500 704-005-0201-9

McDonald, A 1997, 'Lateral boundary conditions for operational regional forecast models: A review', *HIRLAM Technical Report*, no. 32, HIRLAM Project, Norrkoping, Sweden, 31 pp.

Murphy, A H 1993, 'What is a good forecast?.An essay on the nature of goodness in weather forecasting', *Weather and Forecasting*, vol. 8, pp. 281-293.

- Nobre, P, Moura, AD, Sun, L 2001, 'Dynamical Downscaling of Seasonal Climate Prediction over Nordeste Brazil with ECHAM3 and NCEP's Regional Spectral Models at IRI', *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 82, no. 12, pp. 2787-2796.
- Pal, JS, Giorgi, F, Bi, X, Elguindi, N, Solmon, F, Gao, X, Rauscher, S, Francisco, R, Zakey, A, Winter, J, Ashfaq, M, Syed, F, Bell, JI, Diffenbaugh, NS, Rocha, RP da 2007, 'Regional Climate Modeling for the Developing World: The ICTP RegCM3 and RegCNET', *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 88, pp. 1395-1409.
- Palmer, TN & Anderson, DLT 1994, 'The prospects for seasonal forecasting - A review paper', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 120, no. 518, pp. 755-793.
- Palmer, TN, Alessandri, A, Andersen, U, Cantelaube, P y colaboradores 2004, 'Development of a European multimodel ensemble system for seasonal-to-interannual prediction (DEMETER)', *BAMS*, vol. 85, pp. 853-872, doi: 10.1175/BAMS-85-6-853
- Panetta, JSR, Barros, M, Bonatti, JP, Tomita, SS, Kubotta, PY 2006, 'Computational cost of CPTec AGCM', Proceedings of the twelfth ECMWF workshop on use of high performance computing in meteorology, 30 Oct - 3 Nov 2006, Reading, UK.
- Pérez, R, Vega, R, Limia, M 2000, 'Los ciclones tropicales que han afectado a las provincias habaneras de Ciudad Habana y La Habana', *Boletín de SOMETCUBA*, vol. 6, np. 1, publicación en línea, [[http://www.met.inf.cu/sometcuba/boletin/v06\\_n01/espanol/art\\_51.htm](http://www.met.inf.cu/sometcuba/boletin/v06_n01/espanol/art_51.htm)].
- Rummukainen, M 2010, 'State-of-the-art with regional climate models', *WIREs Climate Change*, vol. 1, pp. 82 - 96.
- Rummukainen, M, Bergstrom, S, Persson, G, Rodhe, J, Tjernstrom, M 2004, 'The Swedish regional climate modelling programme, SWECCLIM: a review', *Ambio*, vol. 33, pp.176-182.
- Scinocca, JF, McFarlane, NA, Lazare, M, Li, J 2008, 'The CCCma Third Generation AGCM and its Extension into the Middle Atmosphere', *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 8, pp. 7055-7074.
- Saha, S, Moorthi, S, Wu, X, Wang, J, Nadiga, S, Tripp, P, Behringer, D, Hou, Y-T, Chuang, H-Y, Iredell, M, Ek, M, Meng, J, Yang, R, Peña-Mendez, M, Van den Dool, H, Zhang, Q, Wang, W, Chen, M, Becker, E 2013, 'The NCEP Climate Forecast System Version 2', *J. Climate*, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00823.1.
- Shukla, S, Lettenmaier, DP 2013, 'Multi-RCM ensemble downscaling of NCEP CFS winter season forecasts: Implications for seasonal hydrologic forecast skill', *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 118, no. 19, pp. 10,770-10,790, doi:10.1002/jgrd.50628.
- Staniforth, A 1997, 'Regional modelling: a theoretical discussion', *Meteorol Atmos Phys*, vol. 63, pp. 15-29.

Stockdale, TN, Anderson, DLT, Balmaseda, MA, Doblas-Reyes, F, Ferranti, L, Mogensen, K, Palmer, TN, Molteni, F, Vitart, F 2011, 'ECMWF seasonal forecast system 3 and its prediction of sea surface temperature', *Clim. Dyn.*, doi 10.1007/s00382-010-0947-3

Vitart, F, Huddleston, MR, Déqué, M, Peaje, D, Palmer, TN, Stockdale, TN, Davey, MK, Ineson, S, Weisheimer, A 2007, 'Dynamically-based seasonal forecasts of Atlantic tropical storm activity issued in June by EUROSIP', *Geophysical Research Letters*, vol. 34, no. 16, doi: 10.1029/2007GL030740

Weigel, AP & Mason, S 2011, 'The Generalized Discrimination Score for ensemble forecasts', *Monthly Weather Review*, vol. 139, pp. 3069-3074.

Wilks, DS. & Hamill, T 2007, 'Comparison of ensemble MOS methods using GFS reforecasts', *Mon Weath Rev*, vol. 135, pp. 2379-2390.

Winterfeldt, J, Weisse, R 2009, 'Assessment of value added for surface marine wind speed obtained from two Regional Climate Models (RCM)', *Mon Wea Rev*, vol. 137, no. 9, pp. 2955-2965, doi:10.1175/2009MWR2704.1.

Wu, T, Yu, R, Zhang, F 2008, 'A modified dynamic framework for atmospheric spectral model and its application', *J.Atmos.Sci.*, vol. 65, pp. 2235-2253, doi:10.1175/2007JAS2514.1.

Wu, T, Yu, R, Zhang, F, Wang, Z, Dong, M, Wang, L, Jin, X, Chen, D, Li, L 2010, 'The Beijing Climate Center atmospheric general circulation model: description and its performance for the present-day climate', *Clim.Dyn.*, vol. 34, pp. 123-147, doi:10.1007/s00382-008-0487-2.

WWRP/THORPEX-WCRP 2012, Sub-seasonal to seasonal Prediction Research Implementation Plan, [https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/capabilities\\_in\\_sub\\_seasonal\\_prediction\\_final.pdf](https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/capabilities_in_sub_seasonal_prediction_final.pdf)