

# Predicciones estacionales de ciclones tropicales

por Suzana J. Camargo<sup>1</sup>, Anthony G. Barnston<sup>1</sup>, Philip J. Klotzbach<sup>2</sup> y Christopher W. Landsea<sup>3</sup>

## Introducción

**Las predicciones estacionales de la actividad de los ciclones tropicales en diversas regiones han venido desarrollándose desde las primeras tentativas, efectuadas allá por los comienzos de la década de los ochenta, por Neville Nicholls (1979) para la región australiana, y por William Gray (1984(a), (b)) para la región del Atlántico Norte.** Con el paso del tiempo ha evo Estados Unidos y el Caribe, se ha visto influido por estas predicciones estacionales. Las empresas de seguros y reaseguros también hacen uso de las mismas en su política de decisiones. Es esencial ofrecer a estos usuarios información acerca de la precisión de este tipo de predicciones estacionales, pues cuentan con una utilidad limitada para los responsables de gestionar situaciones de emergencia debido a su falta de capacidad para predecir impactos a nivel de una ciudad o de una comarca.

Tal y como ocurrió en algunos de los anteriores Cursillos Internacionales sobre Ciclones Tropicales (IWTC) de la OMM, en el IWTC-VI celebrado en San José, Costa Rica, en noviembre de 2006, se pasó revista a los progresos de las predicciones estacionales de la actividad de los ciclones tropicales (Camargo y otros, 2006). Estos cursillos, de periodicidad cuatrienal, que cuentan con el patrocinio conjunto del Programa de Investigación sobre Meteorología Tropical de la Comisión de Ciencias Atmosféricas y del Programa de Ciclones Tropicales de la Vigilancia Meteorológica Mundial de la OMM,

Se ha propuesto que las predicciones estadísticas y dinámicas de la actividad de los ciclones tropicales sean accesibles para los predictores y otros usuarios a través de una página web de dominio público.

reúnen a predictores e investigadores en materia de ciclones tropicales para repasar los avances que se están consiguiendo y para planificar actividades de cara al futuro en aspectos tales como las predicciones estacionales. Durante el IWTC-VI, los predictores de diversos países compartieron información acerca de las predicciones estacionales de ciclones tropicales que se llevan a cabo en sus propios países, tratándose, en ocasiones, de información que no conocían bien los demás científicos allí presentes.

Los meteorólogos que trabajan en los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales están interesados en las predicciones estacionales puesto que los medios de comunicación y los responsables de la toma de decisiones suelen formularles preguntas al respecto. El interés de los medios y del público en general en relación con las predicciones de la actividad estacional de los ciclones tropicales ha aumentado de manera increíble desde que se emitieron por primera vez, sobre todo después de 2004, cuando diez ciclones tropicales golpearon Japón y cuatro huracanes llegaron a Florida, en los Estados Unidos.

Aunque las predicciones relativas a la llegada a tierra son especialmente importantes para los usuarios, la peri-

cia de este tipo de predicciones sigue siendo limitada. En la medida en que mejoren las predicciones estacionales de los ciclones tropicales se prestará más atención a los detalles concretos, como las probabilidades regionales de su llegada a tierra. La utilización de estas predicciones específicas se extenderá y adquirirá más importancia para los responsables de la toma de decisiones y para los residentes en las zonas costeras.

Con la popularización de estas predicciones, se antoja fundamental que su documentación y verificación puedan estar ampliamente disponibles. Se recomienda que la OMM elabore directrices encaminadas al desarrollo y validación de estas predicciones, en una línea similar a la del protocolo que se ha llevado a cabo para las predicciones climáticas estacionales a escala mundial (temperatura y precipitación) (OMM, 2001). En la Tabla I figura un resumen de los grupos que emiten predicciones estacionales de ciclones tropicales.

## Predicciones estadísticas estacionales de huracanes

### Universidad del Estado de Colorado

La Universidad del Estado de Colorado (CSU) comenzó a emitir predicciones estacionales iniciales para la cuenca del Atlántico Norte (Gray, 1984 (a), (b)) a principios de junio y a principios de agosto, a partir de 1984; en estas

1 Instituto Internacional de Investigación sobre el Clima y la Sociedad, Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia, Palisades, Nueva York (EEUU)

2 Departamento de Ciencias de la Atmósfera, Universidad del Estado de Colorado, Fort Collins, Colorado (EEUU)

3 Centro Nacional de Huracanes de la NOAA, Miami, Florida (EEUU)

Tabla 1 – Predicciones estacionales de ciclones tropicales: grupos que emiten predicciones, regiones para las cuales se emiten, tipo de predicción, página web donde las predicciones están disponibles.

Grupo	Cuenca	Tipo	Página web
Universidad de la Ciudad de Hong Kong, China (CityU)	Pacífico Noroccidental	Estadística	<a href="http://aposf02.cityu.edu.hk">http://aposf02.cityu.edu.hk</a>
Universidad del Estado de Colorado, EEUU (CSU)	Atlántico	Estadística	<a href="http://hurricane.atmos.colostate.edu">http://hurricane.atmos.colostate.edu</a>
Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET)	Atlántico	Estadística	<a href="http://www.met.inf.cu">http://www.met.inf.cu</a>
Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (CEPMMP)	Atlántico Australia Pacífico Nororiental Índico Norte Índico Sur Pacífico Sur Pacífico Noroccidental	Dinámica	<a href="http://www.ecmwf.int">http://www.ecmwf.int</a> (solo agencias colaboradoras)
Instituto Internacional de Investigación sobre el Clima y la Sociedad (IRI)	Atlántico Australia Pacífico Nororiental Pacífico Sur Pacífico Noroccidental	Dinámica	<a href="http://iri.columbia.edu/forecast/tc_fcst/">http://iri.columbia.edu/forecast/tc_fcst/</a>
Universidad de Macquarie, Australia	Australia/ Pacífico Suroccidental	Estadística	<a href="http://www.iges.org/ellfb/past.html">http://www.iges.org/ellfb/past.html</a>
Oficina Meteorológica, Reino Unido (Met Office)	Atlántico Norte	Dinámica	<a href="http://www.metoffice.gov.uk/weather/tropicalcyclone/northatlantic">http://www.metoffice.gov.uk/weather/tropicalcyclone/northatlantic</a>
Servicio Meteorológico Nacional, México (SMN)	Pacífico Nororiental	Estadística	<a href="http://smn.cna.gob.mx">http://smn.cna.gob.mx</a>
Centro Climático Nacional, China	Pacífico Noroccidental	Estadística	<a href="http://bcc.cma.gov.cn">http://bcc.cma.gov.cn</a>
Perspectivas de huracanes de la NOAA	Atlántico Pacífico Nororiental Pacífico Norte Central	Estadística	<a href="http://www.cpc.noaa.gov">http://www.cpc.noaa.gov</a> <a href="http://www.cpc.noaa.gov">http://www.cpc.noaa.gov</a> <a href="http://www.phr.noaa.gov/hnl/cphc">http://www.phr.noaa.gov/hnl/cphc</a>
Riesgo de Tormentas Tropicales (TSR)	Atlántico Pacífico Noroccidental Región de Australia	Estadística	<a href="http://tsr.mssl.ucl.ac.uk">http://tsr.mssl.ucl.ac.uk</a>

predicciones se utilizaban relaciones estadísticas entre la actividad ciclónica tropical y el fenómeno de El Niño/Oscilación Austral (ENOA), la Oscilación Cuasibienal (QBO) y las presiones al nivel del mar de la cuenca del Caribe. Hablando en términos comparativos, se predijeron más ciclones tropicales en la fase fría del ENOA, cuando la QBO estaba en su fase occidental y las presiones al nivel del mar de la cuenca

del Caribe se encontraban en cifras por debajo de las normales. Las técnicas de predicción estadística de los ciclones tropicales del Atlántico Norte han evolucionado desde estas primeras predicciones: se incorporaron más predictores al esquema inicial de predicción, la QBO ya no se emplea como predictor y las previsiones estacionales comenzaron a emitirse a principios de diciembre del año anterior. Klotzbach y

Gray (2004) y Klotzbach (2007) explican el actual esquema de predicción.

Owens y Landsea (2003) analizaron la pericia de las predicciones estacionales operativas de Gray para los ciclones tropicales en la zona del Atlántico frente a la climatología y a la persistencia. Su estudio arrojó que, para el período analizado (1984-2001), tanto las previsiones estadísticas básicas como

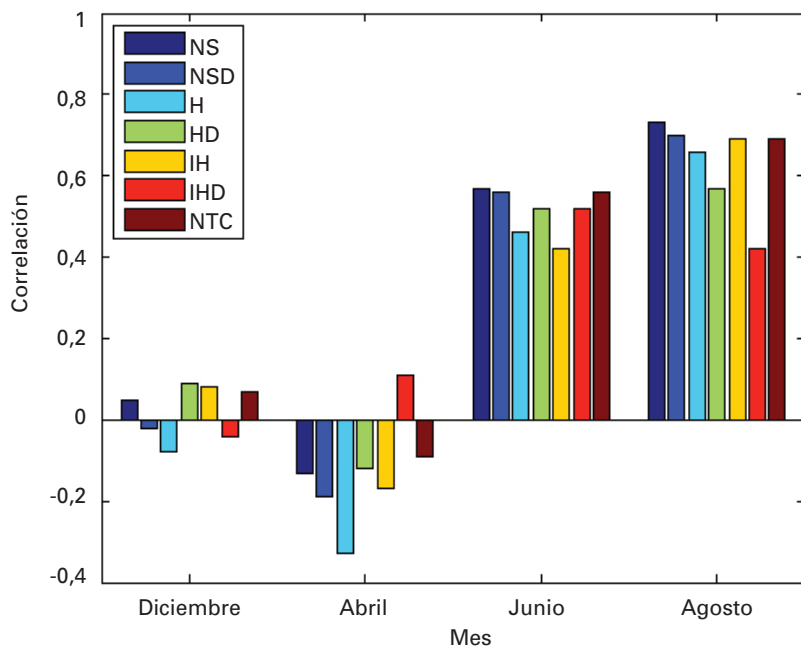


Figura 1 – Correlaciones de las predicciones estacionales de la CSU en diferentes períodos: diciembre (1992-2006), abril (1995-2006), junio (1984-2006 ó 1990-2006) y agosto (1984-2006 ó 1990-2006). Las correlaciones se facilitan para las siguientes variables: número de tormentas con nombre (NS), número de días con tormenta nombrada (NSD), número de huracanes (H), número de días con huracán (HD), número de huracanes intensos (IH), número de días con huracán intenso (IHD) y actividad neta de los ciclones tropicales (NTC). Las correlaciones significativas, para un nivel de significación del 95%, son: junio-NS, NSD, H, HD, IHD, NTC, agosto-NS, NSD, H, HD, IH y NTC. No hay correlaciones significativas para los períodos de diciembre y abril.

una versión más ajustada demostraban pericia frente a la climatología y a la persistencia, observándose que las predicciones ajustadas tenían un mayor grado de acierto que las básicas.

La Figura 1 muestra la pericia de las predicciones de la CSU en diversos períodos, empleando la correlación lineal como una medida del grado de acierto. La pericia mejora en gran medida en junio y agosto, probablemente debido a que la barrera de primavera del ENOA es inexistente. Puesto que la situación del fenómeno ENOA suele definirse en torno al mes de junio, las predicciones de huracanes efectuadas en junio, o más tarde, resultan ser más acertadas. Otro motivo que explica la mayor pericia en los meses de junio y agosto es que la estación está a punto de comenzar, o ya lo ha hecho.

La CSU comenzó a emitir predicciones de probabilidades de llegada a tierra en agosto de 1998. Estas probabilidades de tocar tierra se basan en una predicción de la actividad neta de los ciclones tropicales. Por lo general, cuando se pronostica una estación activa (elevada

actividad neta de los ciclones tropicales), la probabilidad de tocar tierra se incrementa (Klotzbach, 2007).

### Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera (NOAA)

La NOAA viene publicando perspectivas estacionales de huracanes para las regiones del Atlántico y del Pacífico Nororiental desde 1998 y 2003, respectivamente. Estas perspectivas se facilitan al gran público como deterministas y probabilísticas, empleando terciles. Están basadas en la situación del ENOA (Gray, 1984 (a)) y en el modo pluridecena tropical (por ejemplo, Chelliah y Bell, 2004), que incorpora los modos principales de la variabilidad en las precipitaciones convectivas tropicales que se dan en escalas de tiempo pluridecena. Aspectos importantes de esta señal, que están relacionados con una activa estación de huracanes en la zona del Atlántico, incluyen un fuerte monzón en África Occidental, una reducida cizalladura vertical del viento en el Atlántico tropical, una convección inhibida en la

cuenca amazónica y elevadas temperaturas en la superficie del mar (TSM) en el Atlántico tropical (Goldenberg y otros, 2001). En la Figura 2 se muestran las predicciones y verificaciones de la NOAA para las tormentas con nombre, huracanes, grandes huracanes y energía ciclónica acumulada (ACE) (Bell y otros, 2000) que se han registrado durante el período de 1998 a 2006.

Desde 1997, el Centro de Huracanes del Pacífico Central publica, en el mes de mayo, predicciones estacionales relativas al rango en el número de ciclones tropicales en la región central del Pacífico Norte, basándose en el estado del fenómeno ENOA y en la oscilación decenal del Pacífico.

### Riesgo de Tormentas Tropicales (TSR)

El consorcio Riesgo de Tormentas Tropicales (TSR, acrónimo inglés de *Tropical Storm Risk*) emite predicciones estadísticas de la actividad ciclónica tropical en las regiones del Atlántico, el Pacífico Noroccidental y Australia. El modelo de predicción estacional se sirve de los pronósticos del ENOA (Lloyd-Hughes y otros, 2004) para predecir el índice ACE en el Pacífico Noroccidental, presentando una buena pericia en el modo de predicción retrospectiva para esa región (Lea y Saunders, 2006).

En un documento reciente (Saunders y Lea, 2005), el TSR describe su nuevo modelo de predicción, publicado a primeros de agosto, para las predicciones estacionales de la actividad de la llegada a tierra de huracanes en el litoral de los Estados Unidos. El modelo emplea patrones de viento del mes de julio para predecir el índice ACE estacional en los Estados Unidos (de hecho, hace referencia a la energía eólica acumulada procedente de todos los ciclones tropicales que azotan a los Estados Unidos). Los vientos de estas regiones, promediados en altura para el mes de julio, son indicativos de las configuraciones de circulación atmosférica que favorecen o entorpecen que los huracanes puedan alcanzar las costas norteamericanas. El modelo anticipa de forma acertada si las pérdidas de huracanes en Estados Unidos se encuentran por encima o por debajo de la mediana para el 74 por ciento de las predicciones retros-

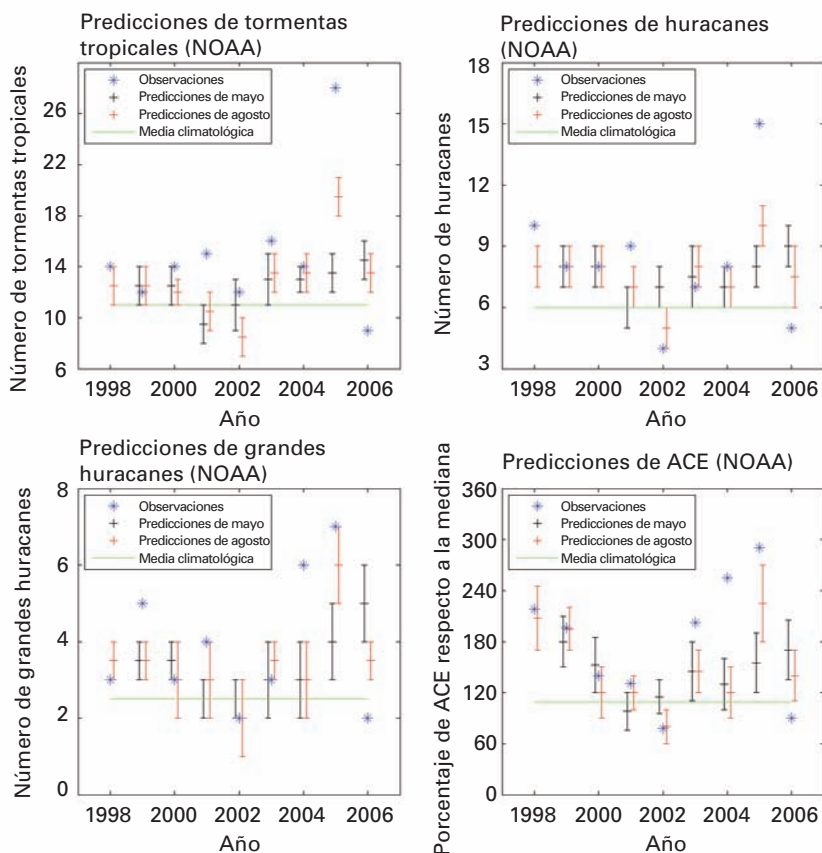


Figura 2 – Predicciones de la NOAA (períodos de mayo y agosto) y observaciones relativas a los ciclones tropicales con intensidad de tormenta tropical o mayor, huracanes, grandes huracanes y ACE (energía ciclónica acumulada, Bell y otros, 2000) para el período 1998-2006.

pectivas durante el período 1950-2003. El modelo igualmente funcionó bien en lo que respecta a su funcionamiento en "tiempo real" en 2004 y 2005, mientras que sobrestimó la predicción en 2006.

## Universidad de la Ciudad de Hong Kong (China)

Johnny Chan y sus colegas han emitido predicciones estacionales sobre la actividad ciclónica tropical en la cuenca del Pacífico Noroccidental (número de ciclones tropicales y tifones) desde 1997. Las predicciones estadísticas se basan en diversas condiciones ambientales del año anterior, hasta la primavera del hemisferio norte de la estación de predicción. Entre las condiciones atmosféricas y oceánicas más destacadas se incluye el ENOA, la extensión de la dorsal subtropical del Pacífico y la intensidad de la vaguada indio-birmana (Chan y otros, 1998). Durante algunos años se emitieron también (Liu y Chan, 2003) predicciones relativas al

número de ciclones tropicales que llegan a tierra. En la actualidad se está mejorando el modelo de predicción de llegada a tierra para el Mar de la China Meridional. En la Figura 3 se muestran las predicciones y las verificaciones de la Universidad de la Ciudad de Hong Kong (China). En la mayor parte de los años, el número de ciclones tropicales observados se encuentra dentro del margen del número de los previstos, con la excepción del año 2006.

## Instituto de Meteorología de Cuba

El Instituto de Meteorología de Cuba viene emitiendo predicciones estacionales sobre la actividad de los huracanes en la zona del Atlántico desde 1996. Actualmente, la predicción estacional en Cuba se basa en la solución de una regresión y un método análogo, y pronostica diversos parámetros relativos a los ciclones tropicales (véase la Tabla II) (Ballester y otros, 2004 (a) y (b)). El Instituto de Meteorología de Cuba se encarga también de la emisión de predicciones estadísticas de la llegada a tierra de huracanes para Cuba, basándose en una metodología de funciones discriminantes (Davis, 1986).

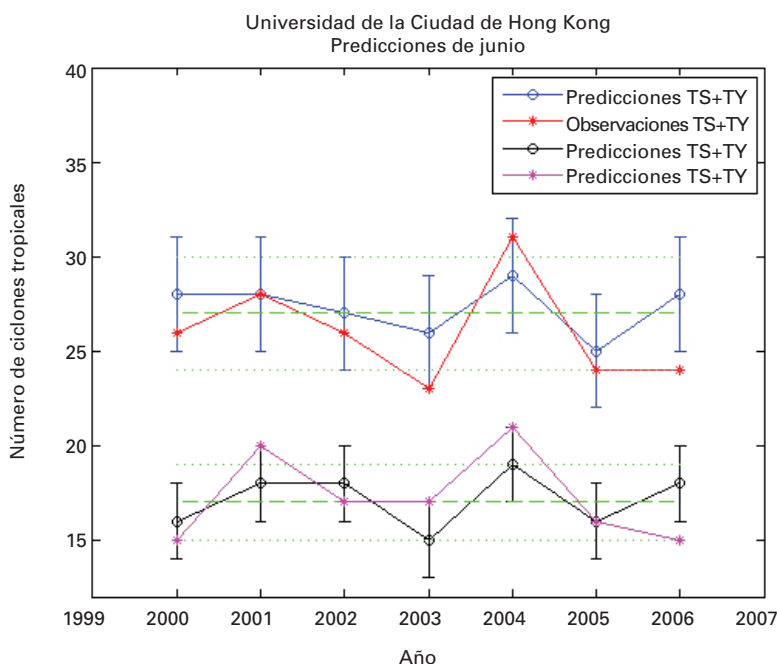


Figura 3 – Verificación de las predicciones de la Universidad de la Ciudad de Hong Kong (China), emitidas a primeros de junio: (arriba) número de tormentas tropicales y tifones (TS+TY) observados y margen de los previstos; (abajo) el número de tifones (TY) observados y margen de los previstos. En verde aparece la media climatológica y la correspondiente desviación típica climatológica.

Tabla II – Predicciones estacionales de ciclones tropicales: predictores y resultados que emplea cada grupo. Los acrónimos de cada grupo aparecen en la Tabla I. Otros acrónimos: CT (ciclones tropicales), ENOA (El Niño-Oscilación Austral), TSM (temperatura de la superficie del mar), PNM (presión al nivel del mar), SOI (índice de Oscilación Austral), OLR (radiación ascendente de ondas largas) y MDR (región de desarrollo principal).

Grupo	Predictores	Resultados
CityU	ENOA Extensión de la dorsal subtropical del Pacífico Intensidad de la vaguada indio-birmana	1. Número de CT 2. Número de CT con nombre 3. Número de tifones
CSU	1. TSM del Atlántico Norte 2. TSM del Atlántico Sur 3. PNM del Pacífico Sur 4. ENOA 5. Modo meridional del Atlántico	1. Número de CT con nombre 2. Número de días con CT con nombre 3. Número de huracanes 4. Número de días con huracán 5. Número de grandes huracanes 6. Número de días con gran huracán 7. Energía ciclónica acumulada 8. Energía ciclónica tropical neta
INSMET	1. Vientos del Atlántico Norte 2. ENOA 3. Intensidad de la dorsal subtropical del Atlántico 4. TSM del Atlántico Norte 5. Oscilación Cuasibienal	1. Número de CT con nombre 2. Número de huracanes 3. Número de CT con nombre en la MDR del Atlántico, el Caribe y el Golfo de México (por separado) 4. Primer día con génesis de CT en la estación 5. Último día con un CT activo en la estación 6. Número de CT con nombre que se forman en la MDR del Atlántico e impactan sobre el Caribe
CEPMMP	1. Modelo dinámico acoplado 2. Modelo de CT identificados y seguidos en su trayectoria	1. Número de CT con nombre 2. Localización media de la génesis de CT
IRI	1. Diversos escenarios de predicción de TSM 2. Modelos atmosféricos 3. Modelo de CT identificados y seguidos en su trayectoria	1. Número de CT con nombre 2. Energía ciclónica acumulada (solo en el hemisferio norte) 3. Localización media de los CT (solo en el Pacífico Noroccidental)
Univ. Macquarie	1. Índice SOI 2. Gradiente de temperatura potencial equivalente	1. Número de CT 2. Número de CT en el Mar del Coral
Met Office	1. Modelo dinámico acoplado 2. Modelo de CT identificados y seguidos en su trayectoria	1. Número de CT con nombre
SMN	1. Anomalías de la TSM 2. Anomalías del viento ecuatorial 3. OLR del Pacífico ecuatorial	1. Número de CT 2. Número de tormentas tropicales 3. Número de huracanes 4. Número de grandes huracanes
NOAA (Atlántico y Pacífico Oriental)	1. ENOA 2. Modo pluridecenal tropical 3. TSM del Atlántico	1. Número de CT con nombre 2. Número de huracanes 3. Número de grandes huracanes 4. Energía ciclónica acumulada
NOAA (Pacífico Central)	1. ENOA 2. Oscilación Decenal del Pacífico	1. Número de CT
Riesgo de Tormentas Tropicales (TSR)	1. Vientos alisios 2. TSM de la MDR 3. ENOA 4. Presión al nivel del mar en el Pacífico Norte central	1. Número de CT con nombre 2. Número de huracanes 3. Número de grandes huracanes 4. Energía ciclónica acumulada 5. ACE de CT que llegan a tierra 6. Número de CT con nombre que llegan a tierra 7. Número de huracanes que llegan a tierra 8. Número de grandes huracanes que llegan a tierra

## Universidad del Estado de Florida (FSU)

James Elsner y sus colegas han estado desarrollando técnicas de modelización estacional de la actividad de los huracanes y de su llegada a tierra. Aunque sus previsiones no son operativas, su metodología es empleada actualmente para emitir predicciones específicas, por regiones, para diversas empresas (James Elsner, comunicación personal, 2006). El grupo de la FSU fue pionero en diversos aspectos relacionados con la predicción estacional, como por ejemplo, la utilización de una distribución de Poisson para el recuento del número de huracanes (Elsner y Schmertmann, 1993), la influencia de la fase de la Oscilación del Atlántico Norte en las trayectorias de los huracanes atlánticos y la actividad de los mismos en las costas de los Estados Unidos (Elsner y otros, 2001), así como el desarrollo de un modelo estadístico de mucha pericia para las predicciones estacionales de probabilidad de llegada a tierra a lo largo de la costa sureste de los Estados Unidos (Lehmiller y otros, 1997). Más recientemente, Elsner y Jagger (2006) desarrollaron un modelo bayesiano para predecir las llegadas a tierra estacionales en los Estados Unidos, empleando como predictores los valores de mayo y junio de la Oscilación del Atlántico Norte, el Índice de Oscilación Austral y la Oscilación Multidecenal del Atlántico.

## Servicio Meteorológico Nacional de México

El Servicio Meteorológico Nacional de México realiza desde 2001 una predicción estacional de la actividad ciclónica tropical para la cuenca del Pacífico Noreste. Su metodología hace uso de los años análogos y fue desarrollada inicialmente por Arthur Douglas en la Universidad de Creighton. Las predicciones se emiten inicialmente en enero y se actualizan en mayo, junio y agosto. Se emplean diversos predictores, entre los que se incluyen la TSM y las configuraciones de circulación atmosférica sobre el Pacífico Norte, así como la radiación ascendente de ondas largas a lo largo del Pacífico ecuatorial. A continuación se utiliza un análisis por grupos para identificar los años más similares del registro histórico.

## Australia y el Pacífico Suroeste

Desde la temporada 2004-2005, las predicciones para la región de Australia y el Pacífico Suroeste se presentan anualmente en la publicación del mes de diciembre del Boletín de predicciones experimentales a largo plazo. Estas predicciones están basadas en un modelo de regresión de Poisson, y emplean como predictores el gradiente de la temperatura potencial equivalente saturada de septiembre y el índice de Oscilación Austral (McDonnell y Holbrook, 2004 (a), (b)). También se han desarrollado predicciones para subregiones más pequeñas, entre las cuales la que cuenta con una mejor pericia de predicción retrospectiva se encuentra en el Mar del Coral, donde el fenómeno ENOA tiene su mayor influencia.

## Otras predicciones

La Administración Meteorológica de China emite predicciones sobre la actividad de tifones para el oeste del Pacífico Norte desde principios de la década de 1980. Desde 1995, cuando se creó el Centro Climático Nacional, se ha venido celebrando un cursillo a escala nacional en el mes de abril. También se han desarrollado predicciones para los tifones que llegan a tierra en el Mar de la China Meridional y en la zona oriental del país. Estas predicciones estacionales se están mejorando constantemente gracias al Centro Climático Nacional y al Instituto de Tifones de Shanghái.

El grupo de predicción de la Universidad del Estado de Carolina del Norte presentó una nueva metodología de predicción estacional para los huracanes de la zona del Atlántico en la XXVII Conferencia sobre huracanes y meteorología tropical de la Sociedad Meteorológica Estadounidense (Y. Yan y otros, 2006), y ofreció sus predicciones para la temporada de 2006. Estas predicciones relativas al número de huracanes y al número de huracanes que tocan tierra se basan en el ENOA, en la cizalladura vertical del viento, en el modo dipolar del Atlántico y en la Oscilación del Atlántico Norte, tal y como se explica en Xie y otros (2004, 2005).

Es probable que se estén emitiendo otras predicciones estadísticas por parte de diferentes agencias a lo largo y ancho del mundo y de las que nosotros no tenemos constancia.

## Predicciones estacionales dinámicas de ciclones tropicales

Muchos estudios han mostrado que los modelos climáticos de baja resolución son capaces de simular perturbaciones similares a los ciclones tropicales (por ejemplo, Manabe y otros, 1970; Bengtsson y otros, 1982). Estas perturbaciones tienen propiedades análogas a las de los ciclones tropicales observados, pero suelen ser más débiles y de mayor escala. Son más realistas en simulaciones de mayor resolución (por ejemplo, Bengtsson y otros, 1995).

Aunque las simulaciones de baja resolución no resultan adecuadas para la predicción individualizada de trayectorias e intensidades de ciclones, algunos modelos climáticos cuentan con cierta pericia a la hora de predecir niveles de actividad ciclónica tropical estacional. Son capaces de reproducir las influencias típicas del fenómeno ENOA (por ejemplo, Vitart y otros, 1997).

El Instituto Internacional de Investigación (IRI) sobre el Clima y la Sociedad, el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (CEPMMP) y, más recientemente, el Met Office del Reino Unido, publican predicciones estacionales experimentales relativas a la frecuencia de las tormentas tropicales, basándose en modelos dinámicos. Las predicciones del IRI y del Met Office están disponibles de forma gratuita en internet, mientras que las predicciones del CEPMMP están disponibles en línea para las agencias colaboradoras. Tanto las predicciones del CEPMMP como las del Met Office se basan en modelos acoplados atmósfera-océano (Vitart y Stockdale, 2001). Las predicciones experimentales del IRI se realizan empleando un procedimiento en dos niveles. En primer lugar, se predicen varios escenarios posibles para la TSM mediante la utilización de modelos estadísticos o dinámicos. A continuación, se fuerzan los modelos atmosféricos con estas TSM previstas. En ambos casos

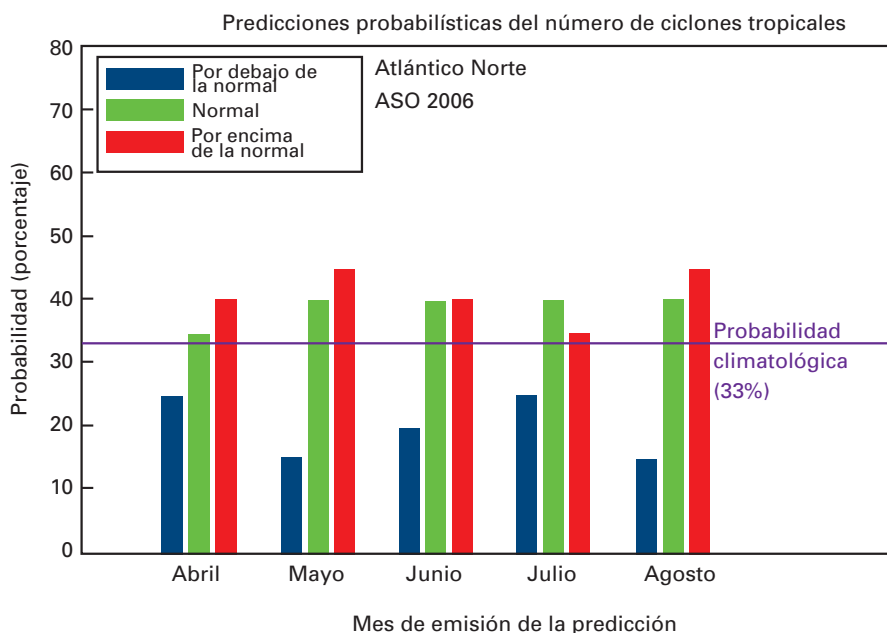


Figura 4 – Probabilidades de las predicciones dinámicas experimentales del IRI para el período de agosto a octubre (ASO) de 2006 en la zona del Atlántico, según diferentes horizontes de predicción. La categoría normal se establece entre seis y nueve ciclones tropicales con nombre; la categoría por debajo de lo normal, en cinco o menos ciclones tropicales con nombre; y la categoría por encima de lo normal, en 10 ó más. En 2006 hubo siete ciclones tropicales con nombre en el Atlántico durante el período ASO, es decir, la estación se encuadró en la categoría normal.

se identifican los vórtices similares a los ciclones tropicales y se representan sus trayectorias en las salidas del modelo atmosférico (por ejemplo, Camargo y Zebiak, 2002). El IRI también realiza predicciones de la ACE para varias regiones del hemisferio norte basándose en modelos dinámicos. Las predicciones del IRI son probabilísticas, con categorización por terciles (por encima de la normal, normal y por debajo de la normal), como en el ejemplo para el Atlántico del año 2006 (Figura 4). El índice de acierto por rangos de probabilidad de las predicciones del IRI realizadas en julio, para los meses de agosto a octubre en el Atlántico durante el período 2003-2006, es positivo con un valor aproximado de 0,12.

La pericia de algunos de los modelos dinámicos que presentan un mejor comportamiento a la hora de pronosticar la frecuencia de las tormentas tropicales es comparable a la de los modelos estadísticos de determinadas cuencas oceánicas. A lo largo del Océano Índico, tanto en su parte septentrional como en la meridional, los modelos dinámicos suelen tener un rendimiento pobre (Camargo y otros, 2005). No está claro hasta qué punto esto es debido a errores del modelo o a una ausencia

de predictibilidad. De forma similar a lo que ocurre con las predicciones climáticas estacionales, si se combinan predicciones de diferentes modelos (predicciones por conjuntos multi-modelo) parece que se producen mejores resultados generales que si se usan las predicciones por conjuntos de un modelo individual (Vitart, 2006). La

pericia de la predicción retrospectiva de algunos modelos climáticos dinámicos para predecir la actividad estacional de los ciclones tropicales se aborda en Camargo y otros (2005) y en Vitart (2006). Las predicciones dinámicas multi-modelo que se efectúan en Europa (EUROSIP) relativas a la frecuencia de ciclones tropicales distinguieron con total acierto la tremendamente activa temporada de huracanes del Atlántico de 2005, de la correspondiente a 2006, menos activa de lo normal (Vitart y otros, 2007). Las previsiones del EUROSIP no están disponibles actualmente para el gran público. En la Figura 5 se muestra el número previsto de tormentas tropicales según las predicciones retrospectivas (1993-2004) y en tiempo real (2005-2006) del EUROSIP (Vitart y otros, 2007, Figura 3).

La predicción estacional de la llegada a tierra de los ciclones tropicales supone un gran reto para los modelos dinámicos. Los ciclones tropicales toman una ruta hacia los polos que no resulta realista en algunos de los modelos empleados por los sistemas de predicción estacional, debido en parte a la pobre resolución horizontal de los modelos, que conduce a unos vórtices mayores que los observados. Es probable que estos grandes vórtices se hallen más influidos por el efecto beta. Los modelos climáticos de resolución más fina son capaces de reproducir las diferencias en las llegadas a tierra aso-

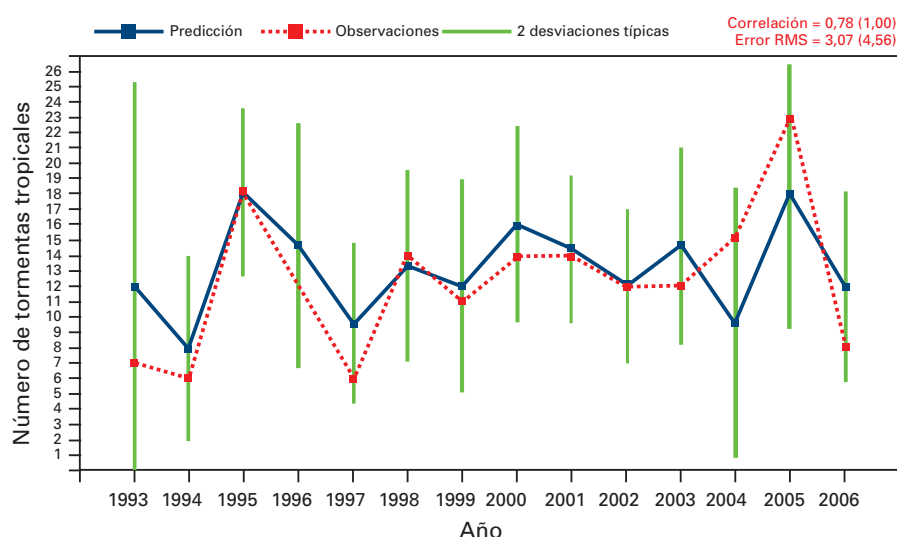


Figura 5 – Número de tormentas tropicales desde julio hasta noviembre previstas por el EUROSIP (mediana) a partir del 1 de junio (línea azul continua) para el período 1993-2006. Se emplearon predicciones retrospectivas para el período 1993-2004, y predicciones en tiempo real para el 2005-2006. Las observaciones se señalan con la línea de puntos rojos, y las líneas verdes verticales representan dos desviaciones típicas dentro de la distribución por conjuntos multi-modelo (figura original de Vitart y otros, 2007).

ciadas a los efectos del ENOA como, por ejemplo, las acaecidas en Mozambique (Vitart y otros, 2003). Otro posible enfoque para predecir el riesgo de llegada a tierra de los ciclones tropicales mediante modelos dinámicos incorporaría técnicas estadísticas, como la de agrupamiento de trayectorias (Camargo y otros, 2007 (a)).

Un enfoque alternativo para la predicción de ciclones tropicales empleando modelos climáticos implica la simulación de la variabilidad interanual de variables ambientales que afectan a la actividad ciclónica tropical (por ejemplo, Ryan y otros, 1992). Uno de los inconvenientes de esta aproximación es que requiere elegir qué variables o combinaciones de las mismas deberían analizarse. Recientemente, algunos estudios se encargaron de comparar ambos enfoques empleando los mismos modelos climáticos (por ejemplo, McDonald y otros, 2005; Camargo y otros, 2007 (b)). Ambas aproximaciones podrán emplearse en el futuro, puesto que son complementarias.

## La importancia de la predicción del ENOA

Los episodios de ENOA modifican de modo coherente los patrones estacionales de temperatura y precipitación en muchas partes del mundo (Bradley y otros, 1987; Ropelewski y Halpert, 1987). Dependiendo de la época del año, los fenómenos de ENOA pueden predecirse con varios meses de antelación y con un grado de acierto de modesto a moderado (Cane y Zebiak, 1985). Las previsiones de ENOA suelen emplearse como un componente importante de las predicciones climáticas estacionales probabilísticas en diversos centros (Goddard y otros, 2001).

Los ciclones tropicales también se ven afectados por el ENOA en diversas partes del mundo. La relación entre ambos se documentó por primera vez en una serie de publicaciones de Neville Nicholls para la región australiana (Nicholls, 1979). Durante los episodios cálidos del ENOA, se originan menos ciclones cerca de Australia, mientras que en los episodios fríos aumenta el riesgo de ciclones que tocan tierra en Australia, y hay un mayor número

de ellos que afectan a Queensland. El impacto del ENOA sobre los ciclones del Atlántico Norte fue analizado por primera vez por William Gray (Gray, 1984 (a)). La influencia de este fenómeno en la actividad de los tifones del Pacífico Noroccidental fue estudiada por primera vez por Chan (1985). En todos los casos, la relación existente entre el ENOA y los ciclones tropicales era posteriormente desarrollada en forma de predicciones estadísticas que pronosticaban la actividad estacional.

El estado del fenómeno ENOA es de vital importancia en el nivel de la actividad estacional y en el carácter de los ciclones tropicales en todas las cuencas oceánicas. Este es el caso no solo como consecuencia de la importancia evidente del estado del ENOA para el patrón de anomalías de la TSM en la cuenca oceánica tropical, sino también debido a la influencia del ENOA

en campos de variables atmosféricas locales como, por ejemplo, el patrón horizontal a gran escala de la circulación anómala y de la altura de geopotencial, la divergencia en niveles superiores y la cizalladura vertical del viento. Por tanto, nuestra capacidad de predicción del estado del ENOA con varios meses de antelación resulta esencial para poder predecir la actividad ciclónica tropical en el mismo período de tiempo, empleando metodologías estadísticas o dinámicas.

La predictibilidad del ENOA sigue un ciclo estacional de sobra conocido, durante el cual la predicción del ENOA a 4-6 meses vista se lleva a cabo de forma más precisa desde un momento de partida que se encuentre entre julio y noviembre que si se efectúa entre enero y marzo. Esto es debido a la existencia de una "barrera de predictibilidad" entre los meses de abril y

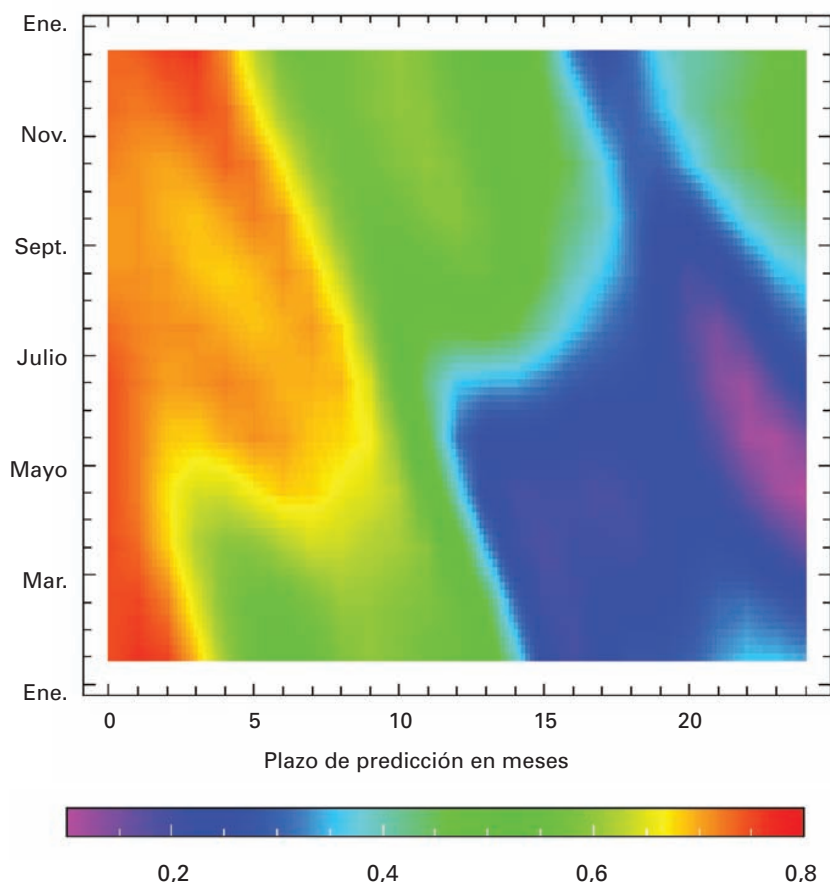


Figura 6 – Precisión del modelo de predicción del ENOA, de Zebiak y Cane, para el pronóstico de las anomalías de la temperatura de la superficie del mar en Niño-3 para unos meses de inicio de la predicción retrospectiva y un plazo de predicción retrospectiva variables. Los colores muestran la precisión como correlación entre las predicciones retrospectivas y las observaciones correspondientes. El eje vertical indica el mes desde el que se realiza la predicción retrospectiva, y el eje horizontal es el plazo de la predicción. Por ejemplo, una predicción retrospectiva efectuada desde julio con un plazo de dos meses sería una predicción retrospectiva para septiembre, mientras que con un plazo de 24 meses (lado derecho de la figura) sería una predicción retrospectiva para el mes de julio dos años después de que se efectuara la predicción retrospectiva.



junio que hace que las predicciones realizadas justo antes de ese período se vean dificultadas por la acción de la barrera. El momento de la estación en que surge la barrera de predictibilidad está relacionado con el ciclo de vida de los episodios de ENOA, que suelen aparecer entre los meses de abril y junio, y duran hasta el siguiente período de marzo-mayo. Una vez que uno de estos episodios ha comenzado, predecir su continuidad durante los próximos 9 a 12 meses es una tarea mucho más sencilla que predecir su aparición inicial. Incluso un fuerte episodio de El Niño como, por ejemplo, el que tuvo lugar en 1997/1998, no pudo predecirse de forma correcta antes de que se observaran signos de su aparición inicial en la primavera de 1997 en el hemisferio norte (Barnston y otros, 1999). Aun tras hacerse patente en las observaciones llevadas a cabo a finales de abril y mayo de 1997, la intensidad de este episodio extremo de El Niño fue subestimada por la predicción de la mayor parte de los modelos, aunque algunos de ellos sí que anticiparon de forma correcta el rápido debilitamiento en la primavera de 1998 (Landsea y Knaff, 2000).

Existe un variable grado de acierto en las predicciones del ENOA, tal y como se ha puesto de manifiesto mediante las predicciones en Nino3 obtenidas con el modelo acoplado simple (Figura 6) de Zebiak y Cane (1987). Aunque esta pericia se refiere a un modelo concreto, en líneas generales establece una aproximación para los grados de acierto en las predicciones realizadas con otros modelos, tanto dinámicos como estadísticos, puesto que representan la predictibilidad básica que se refleja de forma similar a lo largo de la mayoría de los modelos actuales. Es evidente que la pericia de las predicciones efectuadas en marzo es elevada durante tan solo 2 ó 3 meses, mientras que en el caso de predicciones formuladas en agosto, se extiende a plazos de predicción mayores. Las mejoras en la pericia de la predicción mediante la utilización de los modelos dinámicos más avanzados que existen hoy en día han sido pequeñas, y aún está por ver si son o no posibles mejoras sustanciales, dadas las características señal-ruido inherentes al sistema océano-atmósfera. La "física lenta" relativa a la dinámica del ENOA podría predecirse mejor a través de modelos estadísticos y dinámicos en el

Predicciones de ENOA según el modelo del IRI desde mayo de 2006

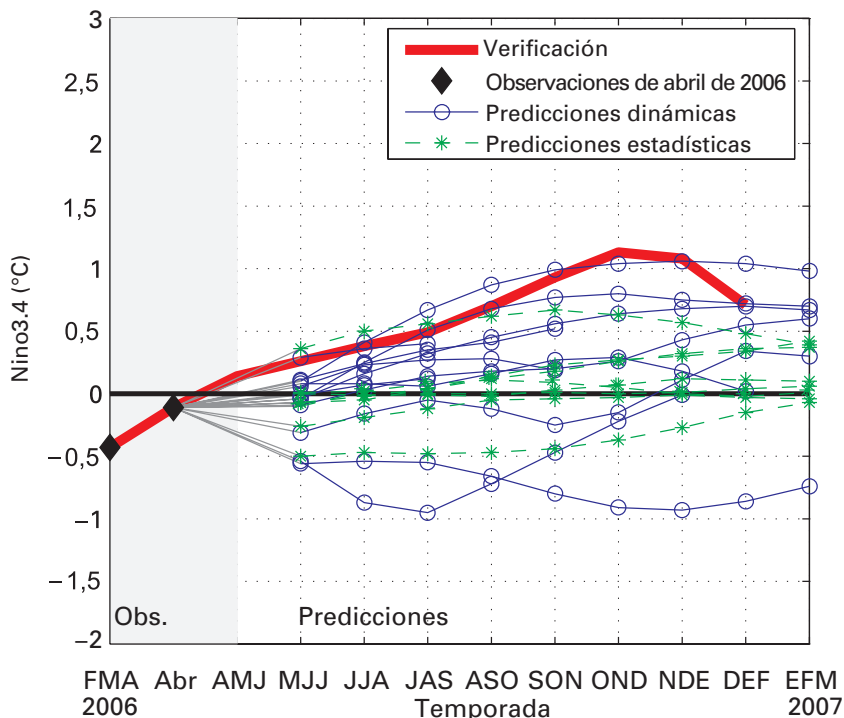


Figura 7 – Predicciones estadísticas y dinámicas de mayo de 2006 con respecto al índice Nino3.4 (anomalías) empleando las observaciones del mes de abril. También se muestran las observaciones de la región Nino 3.4.

futuro. Sin embargo, predecir mejor los episodios que ocurren a una escala temporal menor y que también son importantes a la hora de desencadenar el inicio de El Niño como, por ejemplo, la Oscilación de Madden-Julian, podría revelarse como algo casi imposible en plazos de predicción de varios meses. En la Figura 7 se muestran las predicciones del mes de mayo, recogidas por numerosos modelos estadísticos y dinámicos, relativas al episodio de El Niño de 2006/2007. Muy pocos modelos fueron capaces de predecir este episodio, que tuvo un inicio tardío y no fue demasiado intenso.

La barrera de predictibilidad del ENOA tiene implicaciones claras para las predicciones de actividad ciclónica tropical en el hemisferio norte al compararlas con las predicciones de actividad en el hemisferio sur. La actividad ciclónica tropical en el hemisferio norte es bastante más complicada de predecir, puesto que sus picos estacionales se producen muy poco tiempo después de la barrera de predictibilidad del ENOA. Cuando aparece un episodio de ENOA algo más tarde de lo habitual (como fue el caso en los veranos tardíos de 1986 y 2006 en el hemisferio norte), el efecto inhibitor sobre los ciclones tro-

picales del Atlántico Norte no se prevé hasta que el pico estacional, que va desde agosto hasta octubre, ya está comenzando. Esto puede necesitar de un súbito cambio, en forma de actualización final de la predicción estacional, y podría perturbar las planificaciones que se estuvieran ya siguiendo en consonancia con una predicción estacional anterior.

El pico estacional para la actividad en el hemisferio sur tiene lugar al menos seis meses después de la barrera de predictibilidad del ENOA en la primavera del hemisferio norte, lo que ofrece un colchón de seguridad en el plazo de predicción en el cual se pueden efectuar predicciones acertadas sobre el estado del ENOA que cabe esperar durante el pico estacional. Así pues, las sorpresas de última hora en las proyecciones estacionales para las cuencas situadas al sur del ecuador es menos probable que estén afectadas por una proyección poco precisa del ENOA. Sin embargo, queda patente que un obstáculo importante de cara a la mejora de las previsiones para cualquier cuenca oceánica es la calidad, lejos de la perfección, de las predicciones más avanzadas relativas al fenómeno ENOA. Es más, Landsea y Knaff (2000) pusieron de

manifiesto que sigue siendo muy difícil superar un modelo estadístico sencillo que emplee como predictor únicamente la evolución reciente de las anomalías de la TSM en unas pocas regiones tropicales del Pacífico. Este modesto nivel de pericia en la detección del inicio de El Niño sigue existiendo en 2007, tal y como ha quedado patente por las pobres predicciones de El Niño tardío de 2006/2007 (Figura 7). Si la dificultad de predicción del ENOA pudiera superarse, la pericia de las predicciones mejoraría de forma significativa (especialmente en el hemisferio norte).

## Verificación y evaluación de las predicciones estacionales de ciclones tropicales

Como ocurre con las predicciones de cualquier aspecto relacionado con el clima estacional, las predicciones de la actividad ciclónica tropical son susceptibles de una legítima verificación y evaluación (Hastenrath, 1990; Owens y Landsea, 2003). Las medidas de verificación ayudan a comunicar la calidad de las futuras predicciones a usuarios que necesitan saber cómo aplicarlas de forma razonable en sus procesos de toma de decisiones. Las predicciones de la actividad ciclónica tropical se expresan de forma determinista (por ejemplo, una predicción del número exacto de ciclones tropicales o de un intervalo concreto de dichos números en una cuenca oceánica determinada durante el pico estacional) o de forma probabilista (por ejemplo, las probabilidades previstas de que la temporada presente una actividad inferior, similar o superior a la normal). Son absolutamente necesarias medidas de verificación adecuadas para las predicciones de la misma naturaleza realizadas con anterioridad y expresadas en tiempo real y/o para las predicciones retrospectivas validadas de forma cruzada durante un período anterior ampliado, durante el cual no se difundían predicciones en tiempo real. Incluso los mejores intentos de validación cruzada podrían conducir a una estimación un tanto demasiado optimista de la pericia en relación con la que cabe esperar en las predicciones en tiempo real (Barnston y otros, 1994).

Ante la gran difusión de las nuevas predicciones estacionales sobre ciclones tropicales, resulta fundamental que todas las agencias responsables de su elaboración sigan unas pautas normalizadas para producir y verificar las predicciones. Actualmente se está preparando una página web que incluirá predicciones climáticas estacionales emitidas por diversas agencias. Para participar, estas instituciones deberán ajustarse a las directrices marcadas por la OMM en lo que respecta a las predicciones estacionales. En el encuentro IWTC-VI, celebrado en Costa Rica, se sugirió que podría diseñarse una página web similar para las predicciones estacionales relativas a los ciclones tropicales. En primer lugar habrá que desarrollar directrices y normas, al igual que ocurre en las otras predicciones climáticas estacionales.

Un paso necesario será definir una métrica común para los productos de salida de las predicciones estacionales de ciclones tropicales, como son el número de tormentas identificadas con nombre, el número de huracanes, el número de grandes huracanes y la energía ciclónica acumulada. Actualmente, las predicciones dinámicas no proporcionan el número previsto de huracanes y grandes huracanes, principalmente debido a la baja resolución de los modelos, aunque este aspecto podría lograrse en un futuro con modelos de mayor resolución. Algunas variables de la predicción presentadas por grupos individuales como, por ejemplo, el

número de días con huracán, no sería necesario para todas las agencias.

Otra consideración importante a tener en cuenta para la configuración de directrices acerca de las predicciones estacionales de los ciclones tropicales son las medidas de verificación. La Tabla III contiene una lista de medidas de la pericia que podrían emplearse. Se hace especial hincapié en el hecho de que una combinación de varias formas de medición de la pericia ofrecerá una evaluación más completa del grado de acierto de las predicciones.

Las medidas de verificación suelen formularse como una comparación con respecto a una serie de predicciones de referencia, realizadas mediante la utilización de un método mucho más simple y con menos información, como las previsiones para una climatología continua o la persistencia continuada de las observaciones del año anterior, o promediadas a lo largo de los  $n$  años anteriores. Los denominados "índices de acierto" suelen graduarse de tal forma que su valor sea cero cuando la predicciones reales logran un grado de acierto igual al de las predicciones de referencia, y serán de valor uno (ó 100 por ciento) cuando aquellas son absolutamente exactas. La elección de una predicción de referencia es fundamental para la comprensión del significado del índice de acierto. A menudo se utiliza la climatología como predicción de referencia: una predicción a largo plazo del número medio de ciclones tropi-

*Tabla III – Índices de acierto sugeridos para la verificación de las predicciones estacionales deterministas y probabilísticas de la actividad de los ciclones tropicales. La mayor parte de estos índices se describen en libros convencionales de estadística como, por ejemplo, en Wilkes (1995). El índice de acierto por categorías naturales se encuentra en Owens y Landsea (2003), mientras que el índice de probabilidad se describe en Harte y Vere-Jones (2005).*

Tipo de predicción	Verificaciones: índices de acierto
Determinista	<ol style="list-style-type: none"> <li>Índice de acierto basado en la raíz cuadrada del error cuadrático medio</li> <li>Coefficiente de correlación de Pearson</li> <li>Coefficiente de correlación por rangos de Spearman</li> <li>Coefficiente de correlación no centrado (períodos cortos)</li> <li>Sesgo con respecto a la climatología</li> <li>Mejora de porcentaje por encima de la tendencia</li> <li>Índice de acierto por categorías naturales normalizadas</li> </ol>
Probabilística	<ol style="list-style-type: none"> <li>Índice de acierto por rangos de probabilidad</li> <li>Índice de acierto basado en la característica de funcionamiento relativa (CFR)</li> <li>Índice de acierto de probabilidad</li> </ol>

cales como predicción determinista o una predicción de probabilidades climatológicas (como, por ejemplo, 33,3% para cada una de las categorías basadas en terciles) como predicción probabilística.

La superación de una predicción de referencia climática no suele considerarse complicada cuando se supone que existe un cierto grado de acierto en la predicción. Por otro lado, si se asigna la predicción de referencia como acierto de un modelo estadístico, a la hora de verificar un modelo dinámico podría entenderse como si se estuviera situando el nivel de la predicción de referencia en un punto demasiado elevado. Los modelos estadísticos pueden ser capaces de captar gran parte de la predictibilidad inherente al sistema climático a través de los datos históricos observados. La Tabla III ofrece una lista propuesta de medidas de verificación para las predicciones deterministas y probabilísticas.

Algunos ejemplos de las medidas de verificación que se han utilizado con mayor asiduidad teniendo a las predicciones climatológicas como referencia son el índice de acierto basado en el error cuadrático medio (MSESS; OMM, 2002) y el índice de acierto por rangos de probabilidad (RPSS; Epstein, 1969) para las predicciones deterministas y probabilísticas respectivamente. El coeficiente de correlación convencional (es decir, el de Pearson) o el coeficiente de correlación por rangos de Spearman también tienen carácter informativo cuando se aplican a las predicciones deterministas. Cuando la correlación se aplica sobre un pequeño subgrupo de un período de referencia climatológica mucho más largo, el coeficiente de correlación no centrado, en el que la media climatológica no se elimina a la hora de calcular las desviaciones típicas y, por consiguiente, en el caso de las desviaciones de los productos cruzados, podría tratarse de una medida de verificación más adecuada que la correlación típica. Esta circunstancia se cumple particularmente cuando los valores medios del subperíodo difieren notablemente de las medias climatológicas generales.

En el caso de las predicciones dinámicas, debería proporcionarse la pericia de las predicciones retrospectivas (por

ejemplo, Camargo y otros, 2005). De cara a los métodos de predicción estadísticos, la validación cruzada (Michaelsen, 1987) es necesaria para ayudar a reducir la pericia artificial que puede existir en la muestra de datos de práctica, pero que desaparece cuando el método se aplica a una predicción en tiempo real para el futuro. Los métodos estadísticos optimizan los resultados dentro de la muestra de práctica, y no pueden filtrar el componente de la pericia relativo a la adecuación de los parámetros ajustables (como la ponderación de cada uno de los predictores en una técnica de regresión lineal múltiple) con las variaciones aleatorias en la muestra que esté siendo utilizada. En la validación cruzada, los modelos de predicción se obtienen a partir de todos los casos, excepto uno (o más) que se oculta, y estos casos se emplean posteriormente como blanco(s) de la predicción. Este punto se repite con todos los posibles casos, o conjuntos de casos, no revelados y empleados como blanco(s). Los valores de anomalía de los casos ocultos deberán expresarse en función de la climatología creada a partir de los años restantes; estos valores varían levemente cada vez que se oculta(n) un(os) nuevo(s) caso(s).

Las estimaciones de pericia resultantes de las predicciones con validación cruzada son siempre un tanto más bajas y más indicativas de los aciertos que pueden esperarse en casos futuros. Cuando el grado de acierto real es muy alto (por ejemplo, la correlación entre las predicciones y las observaciones correspondientes es mayor de 0,6), la validación cruzada ofrece una pericia ligeramente inferior que la obtenida en la muestra de práctica. Sin embargo, cuando este acierto es bajo (por ejemplo, valores entre 0,2 y 0,4), la validación cruzada arroja unos resultados notablemente más bajos y, en ocasiones, negativos.

Las estimaciones de pericia elaboradas utilizando la validación cruzada pueden emplearse para amortiguar la amplitud de las predicciones estadísticas en tiempo real que usan una muestra completa de práctica para predecir un caso futuro en tiempo real. Esta amortiguación ayuda a contar con cierta protección frente a alguna pericia artificial que pudiera estar presente en la

predicción en tiempo real. Por ejemplo, si un pronóstico de regresión en tiempo real cuenta con una pericia esperada de 0,5 (tal y como señala la varianza explicada por el modelo cuando se utilizan todos los años anteriores disponibles para la práctica) pero el índice de acierto basado en la correlación de la validación cruzada para el mismo modelo es de 0,4, entonces la amplitud de la anomalía de la predicción en tiempo real para un mes futuro debería disminuir en un factor 0,4/0,5 ó 0,8 para tener en cuenta el exceso de confianza asociado al sobreajuste de la muestra finita de datos.

Un aspecto importante que debe tenerse en cuenta es el hecho de que las distintas regiones que sufren ciclones tropicales cuentan con predictibilidades potenciales muy diferentes. Estas diferencias se deben a diversos factores, como por ejemplo, las características climatológicas de la cuenca, la intensidad de la relación de dicha cuenca con el fenómeno ENOA y el momento de la estación de ciclones tropicales de la cuenca con respecto al ciclo del ENOA. Es necesario llevar a cabo investigaciones adicionales para poder trazar un dibujo claro de esta predictibilidad potencial. Lamentablemente, la no homogeneidad de los conjuntos de datos de las trayectorias previsibles y los posibles sesgos en los modelos dinámicos impiden realizar una estimación precisa de la predictibilidad potencial.

## Resumen

La predicción estacional estadística de ciclones tropicales ha recorrido un largo camino desde que comenzara, allá en los inicios de la década de 1980. Junto con las predicciones relativas a la actividad estacional total, algunas predicciones incluyen actualmente pronósticos mensuales individuales y predicciones de la probabilidad de llegada a tierra. En la medida en que continúe mejorando la disponibilidad de conjuntos de datos globales, como por ejemplo los diversos productos de reanálisis, también lo harán las predicciones estadísticas de ciclones tropicales. También contribuiría a aumentar la pericia de las predicciones el hecho de contar con un conjunto de datos globales y actualizados de trayectorias previsibles, que tengan una

calidad homogénea (Landsea y otros, 2004; Kossin y otros, 2007).

En la actualidad se están emitiendo predicciones estacionales dinámicas de ciclones tropicales para varias regiones. Si se aumenta la resolución del modelo se mejoraría el grado de acierto de estas predicciones. A fin de poder predecir las probabilidades de llegada a tierra mediante el uso de modelos dinámicos allá donde sea posible, es preciso analizar, explicar y corregir los sesgos sistemáticos presentes en las trayectorias de los ciclones tropicales según los modelos. Algunos de estos sesgos se deben probablemente a factores distintos a la baja resolución, y es necesario llevar a cabo una investigación más profunda para comprender la capacidad del modelo atmosférico de predecir ciclones tropicales.

La optimización futura de las predicciones estacionales depende en gran medida de unas mejores predicciones del fenómeno ENOA, incluyendo un mayor detalle acerca de las características del mismo, como pueden ser su magnitud, localización y configuración espacial de las anomalías de la TSM. Una parte del grado de acierto de las predicciones estadísticas y dinámicas depende de la calidad de las predicciones del ENOA.

Hoy en día son varias las agencias que emiten predicciones sobre ciclones tropicales. Resulta primordial establecer unas normas para el desarrollo y verificación de estas predicciones, de modo que los usuarios puedan utilizarlas adecuadamente. La OMM podría desarrollar una página web sencilla que ofreciera un acceso fácil a todas las predicciones que se ajustan a las directrices marcadas por la propia Organización.

## Agradecimientos

Algunas secciones del presente documento están basadas en el informe secundario sobre predicciones estacionales y subestacionales de ciclones tropicales, elaborado con motivo del VI curso IWTC celebrado en noviembre de 2006 en Costa Rica. Queremos dar las gracias a las personas que han colaborado en las predicciones estacionales en ese informe: Maritza Ballester (Instituto de Meteorología de la República de Cuba), Mark A. Saunders (Escuela Universitaria

de Londres, Reino Unido) y Frédéric Vitart (Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo). También deseamos agradecer a Michel Rosengaus (Comisión Nacional del Agua, México), Fumin Ren (Academia China de Ciencias Meteorológicas, China), Wes Browning y James Weyman (Centro de Huracanes del Pacífico Central, Hawai, EEUU) la información relativa a sus predicciones. Las sugerencias de Russell Elsberry, Johnny Chan, Eric Blake y Richard Pasch ayudaron a mejorar notablemente el original de este documento. Estamos muy agradecidos a Frédéric Vitart y a los coautores por darnos su autorización para reproducir la Figura 5.

## Referencias

- BALLESTER, M., C. GONZÁLEZ y R. PERÉZ SUARÉZ, 2004(a): Modelo estadístico para el pronóstico de la actividad ciclónica en el Océano Atlántico, el Golfo de México y el Mar de Caribe. *Revista Cubana de Meteorología*, Vol. 11, No. 1, 9 pp. (en español), disponible en [biblio@met.in.cu](mailto:biblio@met.in.cu).
- BALLESTER, M., C. GONZÁLEZ, R. PERÉZ SUARÉZ, A. ORTEGA y M. SARMIENTO, 2004(b): Pronóstico de la actividad ciclónica en la región del Atlántico Norte, con énfasis en el Caribe y Cuba, Informe Científico, Instituto de Meteorología (en español), disponible en [biblio@met.in.cu](mailto:biblio@met.in.cu).
- BARNSTON, A. G., M. H. GLANTZ y Y. HE, 1999. Predictive skill of statistical and dynamical climate models in SST forecasts during the 1997-98 El Niño episode and the 1998 La Niña onset. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80, 217-243.
- BARNSTON, A. G., H. M. VAN DEN DOOL, S. E. ZEBIAK, T. P. BARNETT, M. JI, D. R. RODENHUIS, M. A. CANE, A. LEETMAA, N. E. GRAHAM, C. F. ROPELEWSKI, V. E. KOUSKY, E. A. O'LENIC y R. E. LIVEZEY, 1994: Long-lead forecasts – Where do we stand? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 75, 2097-2114.
- BELL, G. D., M. S. HALPERT, R. C. SCHNELL, R. W. HIGGINS, J. LAWRIEMORE, V. E. KOUSKY, R. TINKER, W. THIAW, M. CHELLIAH y A. ARTUSA, 2000. Climate Assessment for 1999. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81, S1-S50.
- BENGTSSON, L., H. BÖTTGE y M. KANAMITSU, 1982: Simulation of hurricane-type vortices in a general circulation model. *Tellus*, 34, 440-457.
- BENGTSSON, L., M. BOTZET y M. ESCH, 1995: Hurricane-type vortices in a general circulation model. *Tellus*, 47A, 175-196.
- BLAKE, E. S. y W. M. GRAY, 2004: Prediction of August Atlantic basin hurricane activity. *Wea. Forecasting*, 19, 1044-1060.
- BRADLEY, R. S., H. F. DÍAZ, G. N. KILADIS y E. I. EISCHED, 1987: ENSO signal in continental temperatures and precipitation records. *Nature*, 327, 497-501.
- CAMARGO, S. J., M. BALLESTER, A. G. BARNSTON, P. KLOTZBACH, P. ROUNDY, M. A. SAUNDERS, F. VITART y M. C. WHEELER, 2006: Short-term climate (seasonal and intra-seasonal) prediction of tropical cyclone activity and intensity. Topic 4.3, Workshop Topic Reports, Sixth International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-VI), San José, Costa Rica, November 2006, WMO, TMRP 72, 493-499.
- CAMARGO, S. J. y S. E. ZEBIAK, 2002: Improving the detection and tracking of tropical storms in atmospheric general circulation models. *Wea. Forecasting*, 17, 1152-1162.
- CAMARGO, S. J., A. G. BARNSTON y S. E. ZEBIAK, 2005: A statistical assessment of tropical cyclones in atmospheric general circulation models. *Tellus*, 57A, 589-604.
- CAMARGO, S. J., A. W. ROBERTSON, S. J. GAFFNEY, P. SMYTH y M. GHIL, 2007(a): Cluster analysis of typhoon tracks. Part I: General Properties. *J. Climate*, 20, 3635-3653.
- CAMARGO, S. J., A. H. SOBEL, A. G. BARNSTON y K. A. EMANUEL, 2007(b): Tropical cyclone genesis index in climate models. *Tellus* 59A, 428-443, doi: 10.1111/j.1600-0870.2007.00238.x.
- CANE, M. A. y S. E. ZEBIAK, 1985: A theory for El Niño and the Southern Oscillation. *Science*, 228, 1085-1087.
- CHAN, J. C. L., 1985: Tropical cyclone activity in the Northwest Pacific in relation to El Niño Southern Oscillation phenomenon. *Mon. Wea. Rev.*, 113, 599-606.
- CHAN, J. C. L., J. SHI y C. LAM, 1998: Seasonal forecasting of tropical cyclone activity over the western North Pacific and the South China Sea. *Wea. Forecasting*, 13, 997-1004.
- CHAN, J. C. L., J. E. SHI y C. M. LAM, 2001: Improvements in the seasonal forecasting of tropical cyclone activity over the western North Pacific. *Wea. Forecasting*, 16, 997-1004.
- CHAUVIN, F., J.-F. ROYER y M. DÉQUÉ, 2006: Response of hurricane-type vortices to global warming as simulated by ARPEGE-Climat at high-resolution. *Clim. Dyn.*, 27, 377-399.
- CHELLIAH, M. y G. D. BELL, 2004: Tropical multidecadal and interannual climate variability in the NCEP/NCAR reanalysis. *J. Climate*, 17, 1777-1803.
- DAVIS, J., 1986: *Statistics and Data Analysis in Geology*, John Wiley and Sons, Toronto, 646 pp.
- ELSNER, J. B. y T. H. JAGGER, 2004: A hierarchical Bayesian approach to seasonal hurricane modeling. *J. Climate*, 17, 2813-2827.

- ELSNER, J. B. y T. H. JAGGER, 2006: Prediction models for annual US hurricane counts. *J. Climate*, 19, 2935-2952.
- ELSNER, J. B. y C. P. SCHMERTMANN, 1993: Improving extended-range seasonal predictions of intense Atlantic hurricane activity. *Wea. Forecasting*, 8, 345-351.
- ELSNER, J. B., B. H. BOSSAK y X.-F. NIU, 2001: Secular changes to the ENSO-US hurricane relationship. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 4123-4126.
- EPSTEIN, E. S., 1969: A scoring system for probability forecasts of ranked categories. *J. Appl. Meteor.*, 8, 985-987.
- GODDARD, L., S. J. MASON, S. E. ZEBIAK, C. F. ROPELEWSKI, R. E. BASHER y M. A. CANE, 2001: Current approaches to seasonal to interannual climate predictions. *Int. J. Climatol.*, 21, 1111-1152.
- GOLDENBERG, S. B., C. W. LANDSEA, A. M. MESTAS-NÚÑEZ y W. M. GRAY, 2001: The recent increase in Atlantic hurricane activity: causes and implications. *Science*, 293, 474-479.
- GRAY, W. M., 1984(a): Atlantic seasonal hurricane frequency. Part I: El Niño and 30 mb quasi-biennial oscillation influences. *Mon. Wea. Rev.*, 112, 1649-1668.
- GRAY, W. M., 1984(b): Atlantic seasonal hurricane frequency. Part II: Forecasting its variability. *Mon. Wea. Rev.*, 112, 1669-1683.
- HARTE, D. y D. VERE-JONES, 2005: The entropy score and its use in earthquake forecasting. *Pure Appl. Geophys.*, 162, 1229-1253.
- HASTENRATH, S., 1990: Tropical climate prediction: A progress report, 1985-1990. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 71, 819-825.
- KLOTZBACH, P. J., 2007: Recent developments in statistical prediction of seasonal Atlantic basin tropical cyclone activity. *Tellus* 59A, 511-518. doi:10.1111/j.1600-0870.2007.00239.x.
- KLOTZBACH, P. J. y W. M. GRAY, 2004: Updated 6-11 month prediction of Atlantic basin seasonal hurricane activity. *Wea. Forecasting*, 19, 917-934.
- KOSSIN, J. P., K. R. KNAPP, D. J. VIMONT, R. J. MURNANE y B. A. HARPER, 2007: A globally consistent reanalysis of hurricane variability and trends. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L04815, doi:10.1029/2006GL028836.
- LANDSEA, C. W. y J. A. KNAFF, 2000: How much skill was there in forecasting the very strong 1997-1998 El Niño? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 81, 2107-2119.
- LANDSEA, C. W., C. ANDERSON, N. CHARLES, G. CLARK, J. DUNION, J. FERNÁNDEZ-PARTAGAS, P. HUNGERFORD, C. NEUMANN y M. ZIMMER, 2004: The Atlantic database reanalysis project: Documentation for the 1851-1910 alterations and additions to the HURDAT database. Hurricanes and Typhoons: Past, present and future. R.J. Murnane and K.-B. Liu, Editores, Columbia University Press, 177-221.
- LEA, A. S. y M. A. SAUNDERS, 2006: Seasonal prediction of typhoon activity in the Northwest Pacific basin, 27th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, Monterrey, 24-28 April, P. 5.23.
- LEHMILLER, G. S., T. B. KIMBERLAIN y J. B. ELSNER, 1997: Seasonal prediction models for the North Atlantic basin hurricane location. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 1780-1791.
- LIU, K. S. y J. C. L. CHAN, 2003: Climatological characteristics and seasonal forecasting of tropical cyclones making landfall along the South China coast. *Mon. Wea. Rev.*, 131, 1650-1662.
- LLOYD-HUGHES, B., M. A. SAUNDERS y P. ROCKETT, 2004: A consolidated CLIPER model for improved August-September ENSO prediction skill. *Wea. Forecasting*, 19, 1089-1105.
- MANABE S., J. L. HOLLOWAY y H. M. STONE, 1970: Tropical circulation in a time-integration of a global model of the atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 27, 580-613.
- MCDONALD, R. E., D. G. BLEAKEN, D. R. CRESSWELL, V. D. POPE y C. A. SENIOR, 2005: Tropical storms: representation and diagnosis in climate models and the impact of climate change. *Clim. Dyn.*, 25, 19-36.
- MCDONNELL, K. A. y N. J. HOLBROOK, 2004(a): A Poisson regression model of tropical cyclogenesis for the Australian-southwest Pacific Ocean region. *Wea. Forecasting*, 19, 440-455.
- MCDONNELL, K. A. y N. J. HOLBROOK, 2004(b): A Poisson regression model approach to predicting tropical cyclogenesis in the Australian/southwest Pacific Ocean region using the SOI and saturated equivalent potential temperature gradient as predictors. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L20110, doi: 10.1029/2004GL020843.
- MICHAELSEN, J., 1987: Cross-validation in statistical climate forecast models. *J. Clim. Appl. Meteor.*, 26, 1589-1600.
- NICHOLLS, N., 1979: A possible method for predicting seasonal tropical cyclone activity in the Australian region. *Mon. Wea. Rev.*, 107, 1221-1224.
- OWENS, B. F. y C. W. LANDSEA, 2003: Assessing the skill of operational Atlantic seasonal tropical cyclone forecasts. *Wea. Forecasting*, 18, 45-54.
- ROPELEWSKI, C. F. y M. S. HALPERT, 1987: Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 1606-1626.
- RYAN, B. F. e I. G. WATTERSON, 1992: Tropical cyclone frequencies inferred from Gray's yearly genesis parameter: Validation of GCM tropical climate. *Geophys. Res. Lett.*, 19, 1831-1834.
- SAUNDERS, M. A. y A. S. LEA, 2005: Seasonal prediction of hurricane activity reaching the coast of the United States. *Nature*, 434, 1005-1008.
- VITART, F. D., J. L. ANDERSON y W. F. STERN, 1997: Simulation of interannual variability of tropical storm frequency in an ensemble of GCM integrations. *J. Climate*, 10, 745-760.
- VITART, F. D. y T. N. STOCKDALE, 2001: Seasonal forecasting of tropical storms using coupled GCM integrations. *Mon. Wea. Rev.*, 129, 2521-2537.
- VITART, F. D., D. ANDERSON y T. STOCKDALE, 2003: Seasonal forecasting of tropical cyclone landfall over Mozambique. *J. Climate*, 16, 3932-3945.
- VITART, F. D., 2006: Seasonal forecasting of tropical storm frequency using a multi-model ensemble. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 132, 647-666.
- VITART, F., M. R. HUDDLESTON, M. DÉQUÉ, D. PEAKE, T. N. PALMER, T. N. STOCKDALE, M. K. DAVEY, S. INENSON y A. WEISHEIMER, 2007: Dynamically-based seasonal forecasts of Atlantic tropical storm activity. *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1029/2007GL030740, en imprenta.
- WILKES, D. S., 1995: *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Academic Press, 467 pp.
- WMO [OMM], 2001: Standardized Verification System (SVS) for Long-Range Forecasts (LRF). Report 6.3B, April 30 to May 3, 2001. Disponible en: [http://www.wmo.int/web/wcp/clips\\_ictt/SVS-for-LRF.html](http://www.wmo.int/web/wcp/clips_ictt/SVS-for-LRF.html).
- XIE, L., T. YAN y L. J. PIETRAFESA, 2005(a): The effect of Atlantic sea surface temperature dipole mode on hurricanes: Implications for the 2004 Atlantic hurricane season. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L03701, doi: 10.1029/2004GL021702.
- XIE, L., T. YAN, L. J. PIETRAFESA, J. M. MORRISON y T. KARL, 2005(b): Climatology and interannual variability of North Atlantic hurricane tracks. *J. Climate*, 18, 5370-5381.
- YAN, T., L. XIE, L. J. PIETRAFESA y T. R. KARL, 2006: Spatial and temporal variability of North Atlantic hurricane tracks. Proc. 27th Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, P5.20, Monterrey, CA, April, 2006.
- ZEBIAK, S. E. y M. A. CANE, 1987: A model El Niño-Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 321, 827-832.