

---

**CONFERENCIA CIENTÍFICA SOBRE CICLONES  
TROPICALES  
"RODRÍGUEZ RAMÍREZ"  
IN MEMORIAM.**

---

Ciudad de la Habana, Cuba. 7 al 9 de mayo de 1998

---

# MEMORIAS

PATROCINADORES:



SOCIEDAD METEOROLÓGICA DE CUBA.



INSTITUTO DE METEOROLOGÍA.



ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL.

QC  
940.6  
.C66  
1998

# **National Oceanic and Atmospheric Administration**

## **Climate Database Modernization Program**

### **ERRATA NOTICE**

One or more conditions of the original document may affect the quality of the image, such as:

Discolored pages  
Faded or light ink  
Binding intrudes into the text

This document has been imaged through the NOAA Climate Database Modernization Program. To view the original document, please contact the NOAA Central Library in Silver Spring, MD at (301) 713-2607 x124 or [www.reference@nodc.noaa.gov](mailto:www.reference@nodc.noaa.gov).

LASON  
Imaging Subcontractor  
12200 Kiln Court  
Beltsville, MD 20704-1387  
March 28, 2002

**Imagen de la portada:  
Foto de satélite del huracán Lili sobre Cuba  
( 18 de octubre de 1996)**

**NOTA DEL COMITÉ ORGANIZADOR**

Las opiniones expresadas en los diferentes artículos son  
responsabilidad de los autores.

*Estas Memorias representan un homenaje póstumo de la Sociedad Meteorológica de Cuba y del Instituto de Meteorología al Doctor Mario E. Rodríguez Ramírez, quien dedicara su vida al desarrollo de la meteorología y en especial al estudio de los ciclones tropicales.*

## **PATROCINADORES**

---

**Sociedad Meteorológica de Cuba.  
Instituto de Meteorología.  
Organización Meteorológica Mundial.**

## **COMITÉ COORDINADOR PARA LA EDICION DE LAS MEMORIAS**

---

***Presidenta:* Maritza Ballester Pérez.**

***Miembros:***

**Cecilia González Pedroso.**

**Omar García Concepción.**

**Rafael Pérez Parrado.**

**Ramón Pérez Suárez.**

## **COMISION ORGANIZADORA**

---

***Presidente:* César J. Menéndez García.**

***Presidente:* Tomás L. Gutiérrez Pérez.**

***Miembros:***

**Rafael Pérez Parrado.**

**Mario Carnesoltas Calvo.**

**Omar García Concepción.**

**César A. Terrero Escalante.**

**José M. Rubiera Nuñez.**

**Lourdes Alvarez Escudero.**

**Israel Borrajero Montejo.**

**Marvelys López Cabrera.**

**Vilma Tallés Martínez.**

**Andrés Planas Lavié.**

**Jesús J. Dole Chávez.**

**Maria E. Alvarez Oliver.**

## INDICE

Mario Rodríguez Ramírez y su trascendencia histórica .....	1
<i>L.E.Ramos Guadalupe</i>	
National Hurricane Center Progress, Objectives and Goals .....	10
<i>Jerry D. Jarrell</i>	
Climatología de las depresiones tropicales que han afectado a Cuba desde 1920 hasta 1993.....	15
<i>R.Ortiz Héctor</i>	
Are We Entering an Active Era for Major Hurricane Activity?.....	24
<i>S.B.Goldenberg, L.J.Shapiro and Ch.W.Landsea</i>	
Los ciclones tropicales de Cuba. Variaciones y tendencias observadas .....	30
<i>R.Pérez Suárez, M.Ballester, C.González y M.Limia</i>	
Resultados de los pronósticos estacionales para las temporadas ciclónicas de 1996 y 1997 .....	35
<i>M.Ballester, C.González, M.Limia y R.Pérez Suárez</i>	
Seasonal Forecasting of Atlantic Hurricanes .....	42
<i>Ch.W.Landsea and W.M.Gray</i>	
Los ciclones tropicales que afectan a Cuba y su lugar de origen .....	50
<i>M.E.Limia Martínez</i>	
Hurricane Lili track prediction using the MM5 model. An experiment .....	57
<i>R.Pérez Parrado, T.T. Keller and T.T. Warner</i>	
Use of numerical guidance for tropical cyclone forecasting at the National Hurricane: Current state of the art .....	61
<i>Richard J. Pasch</i>	
Sobre un modelo con solución de operadores de paso S fraccionados en el pronóstico del tiempo de la región IV (parte II) .....	65
<i>Enrique Buendía y Rafael Patiño</i>	
Modelo numérico para pronosticar la surgencia que provocan los huracanes en las costas de Cuba .....	74
<i>Omar García y Rafael Pérez Parrado</i>	
Aplicaciones del modelo MONSAC-2 en las costas de Cuba .....	81
<i>Rafael Pérez Parrado, Omar García e Isidro Salas</i>	
Mapa de peligro por surgencias de ciclones tropicales .....	86
<i>Isidro Salas, R. Pérez Parrado, O. García, C. Rodríguez Otero y A.L. Pérez Hernández</i>	
Forecasting tropical cyclone intensity changes: An operational challenge .....	92
<i>Lixion A. Avila Tuma</i>	

## INDICE

Limitations of tropical cyclone intensity estimates from satellite images .....	97
<i>Max Mayfield</i>	
Segmento de la trayectoria del ciclón Lili detectado por la red de radares meteorológicos de Cuba .....	103
<i>Orlando Nuñez Russis</i>	
Satellite and aircraft observations of tropical cyclones .....	112
<i>Patrick Hamill and Henry B. Selkirk</i>	
Impacto del huracán Pauline de 1997 en la costa del Pacífico mexicano .....	116
<i>Erik Sereno y Angel R. Meulenert</i>	
Resultados preliminares del modelo barotrópico simple aplicado al pronóstico de trayectoria de huracanes .....	123
<i>Enrique Azpra Romero</i>	
Ejemplo de interacción de un ciclón tropical y un frente frío en el Golfo de México en 1995 .....	127
<i>L. Guadalupe Matías Ramírez</i>	
Aplicación de métodos de cálculos espectrales del oleaje en el pronóstico a corto plazo de las penetraciones del mar por ciclones tropicales .....	131
<i>Y. Juantorena, P.L. Beabullet y M. Sosa Hurtado</i>	
Influencia de los ciclones tropicales en el régimen de oleajes peligrosos del litoral habanero .....	138
<i>Ida Mitrani y Rafael Pérez Parrado</i>	
Probables causas de errores en el pronóstico de la trayectoria de los ciclones tropicales en la república mexicana.....	145
<i>Orlando Delgado D.</i>	
Análisis del huracán Lili a su paso por el archipiélago Sabana-Camagüey (A.S.C.).....	150
<i>R. Gutiérrez, L.M. Batista, O. Mayola, V. Morales, O. Benedico, L. Castellanos y L. Vázquez</i>	
Huracanes en Cienfuegos y el cambio sinóptico de la presión atmosférica .....	158
<i>A. Fernández, L. Lecha, O. Santana, D. Cubas, A. Ruíz, O. León y O. Navarrete</i>	
Génesis y desarrollo del huracán Allison .....	165
<i>M. Sosa, Y. Juantorena y P. Beabullet</i>	
Origen y evolución de los ciclones tropicales bajo la influencia de los frentes fríos.....	172
<i>E. Mojena, C.M. Góngora, A. Ortega y J. Leyva</i>	
Penetraciones del mar en el litoral norte occidental de Cuba provocadas por el huracán Gordon .....	179
<i>A. del Sol, L. Díaz y M. Sosa</i>	

## INDICE

<b>Cálculo de algunos parámetros del oleaje que ha afectado a Baracoa por ciclones tropicales .....</b>	<b>185</b>
<i>N. Hernández, O. Alvarez, R. Casals y P. Beauballet</i>	
<b>Comportamiento de la temperatura del mar en el Pacifico mexicano y su relación con el desarrollo de los ciclones tropicales en 1997.....</b>	<b>192</b>
<i>Alejandro Martinez Z., Sergey N. Bulgakov, Valentina Davydova y B. Angel Meuleneri P.</i>	

# Mario Rodríguez Ramírez y su trascendencia histórica

*Luis Enrique Ramos Guadalupe  
Sociedad Meteorológica de Cuba  
Museo Nacional de Historia Natural (mnhnc@ceniai.inf.cu)*

**RESUMEN:** El presente trabajo aborda los más importantes rasgos biográficos de Mario Rodríguez Ramírez (1911 - 1996), científico que realizó importantes aportes al conocimiento de la Meteorología Tropical en Cuba. Doctor en Ciencias Físico Químicas (1941) y en Ciencias Físico Matemáticas (1942), obtuvo el grado de *Master of Arts in Meteorology* en la Universidad de California (1947). Rodríguez fue director del Instituto de Meteorología (1965 - 1977). Era conocido en diversos países de Europa y América por su "Teoría Vorticial de los Huracanes". A su iniciativa se debe la introducción y aplicación en Cuba de nuevos métodos de predicción, la reorganización del Servicio Meteorológico Nacional, la puesta a punto de una extensa red de estaciones y radares y de los primeros equipos para la recepción de fotografías de satélites meteorológicos. Uno de sus logros más sobresalientes fue la creación de una Escuela de Meteorología de la que egresaron profesionales de alto nivel científico.

**ABSTRACT:** A briefly biography about Mario Rodríguez Ramírez (1911 - 1996), is presented. He made a remarkable contribution to Cuban Tropical Meteorology. He reached doctoral level in Physical-Chemistry Sciences (1941) and Physical-Mathematics (1942), and got Master of Arts in Meteorology at University of California (1947). Rodríguez was director of Institute of Meteorology of Cuba (1965 - 1977). He was know in several countries of Europe and America because its "Vortex Theory of Hurricanes". He worked on the introduction and aplication in Cuba of news forecasting methods, reorganization of National Meteorological Service, setting up an extensive net of radars and meteorological stations, and the first equipement for reception of meteorological satellites photographs. One of his most sounded successes was the creation of the Meteorology School, with a tradition of high-level graduated students.

Mario Emilio Rodríguez Ramírez nació en Manzanillo, en la actual provincia Granma, el 9 de agosto de 1911.

Su padre, don Francisco Lucas Rodríguez Mojena (1881 - 1956), procedía de Veguitas, localidad perteneciente al "término municipal de Bayamo". Doña María Leonor Ramírez Battle, madre de Mario, aunque de ascendencia cubana, había nacido en Barranquilla, Colombia (1), porque a finales del siglo XIX su familia se había visto obligada a emigrar al vecino país suramericano como resultado de sus vínculos con activistas revolucionarios (2). Tras su retorno a Cuba se establecen en Manzanillo. Coincidentemente, ambos, padre y madre, eran trabajadores profesionales: maestra doña Leonor y periodista don Francisco.

Mario cursó los primeros estudios en su ciudad natal, pero en 1923 la familia se traslada a La Habana. El cambio de domicilio se hizo necesario debido a que don Francisco Rodríguez había sido elegido para ocupar un escaño en la Cámara de Representantes por un periodo de 4 años.

En conformidad con el deseo de sus padres, el joven Mario Emilio matricula en el Colegio de Belén para concluir sus estudios primarios y pasar a la segunda enseñanza. Por entonces el Colegio, a cargo de los religiosos de la Compañía de Jesús, estaba situado en el secular edificio de la calle Compostela, en La Habana Vieja. En 1925 este plantel se traslada a su nueva sede en Mariáano. Cinco años después, el 3 de octubre de 1930, Mario Rodríguez Ramírez recibe su título de Bachiller en Letras y Ciencias (3); tenía entonces 19 años de edad.

En la década de los años treinta, la familia Rodríguez Ramírez residía en la Avenida de Columbia, en Marianao; un lugar aún alejado del centro de la Capital.

### Estudios superiores

El 5 de diciembre de 1930 Mario Rodríguez Ramírez solicita su ingreso en la Facultad de Ciencias de la Universidad de La Habana como aspirante a los títulos de doctor en Ciencias Químico Físicas, doctor en Ciencias Físico Matemáticas, e Ingeniero Civil Electricista (4). Las convulsas circunstancias presentes en la sociedad cubana durante los primeros años de la década de los años 30 le impiden continuar sus estudios, y Mario, apremiado por razones económicas, se ve obligado a emplearse como pesador de caña en el antiguo central "Pilar", en Artemisa. Más tarde (1931 - 1935) será trabajador del sector administrativo en las oficinas de la Secretaría de Hacienda (5).

En 1937 logra al fin proseguir su carrera en el alto centro docente de La Habana. El primero de sus diplomas (Dr. en C. Q. F.) lo obtiene el 1 de agosto de 1941 (6) y, más tarde, en 1942, recibe su segundo título (Dr. en C. F. M.).

Durante el transcurso de su etapa como estudiante universitario, los intereses científicos de Rodríguez, incentivados por los conocimientos que iba adquiriendo en el cautivante universo de la Física, se van orientando cada vez más hacia las Ciencias Naturales. Aparece entonces una fuerte vocación por la Astronomía. A finales de la década de los años 80, Rodríguez volverá a trabajar sobre este tema.

A principios de 1936, y por intermedio del meteorólogo Oscar Riverí, Mario Rodríguez había entrado en contacto con el ingeniero José Carlos Millás Hernández, director del Observatorio Nacional (7). Como resultado de este encuentro y siendo aún estudiante universitario, comienza a trabajar el 9 de marzo de 1936 como auxiliar en el Centro meteorológico de La Habana (8). Sus primeras obligaciones consistían en atender al teléfono durante el horario de la tarde; allí recibe su primer salario mensual: 28 pesos con 23 centavos. En aquella institución fue desempeñando sucesivamente funciones de mayor complejidad que lo llevan a familiarizarse con la realización de observaciones instrumentales y con el ploteo y análisis de los mapas del tiempo; pero su inteligencia y su creciente preparación científica le condujeron por caminos más amplios. Cinco años más tarde, una vez que obtuvo su título como doctor en Ciencias, fue nombrado subdirector del Observatorio Nacional (9).

Poco después (1945) el propio Oscar Riverí realiza gestiones en el *United States Weather Bureau*, con el objeto de que Rodríguez pudiera obtener una beca para realizar estudios de postgrado en los Estados Unidos. La solicitud se formulaba sobre la base de los requisitos establecidos en los acuerdos de cooperación científica y cultural suscritos por entonces entre los Estados Unidos de América y algunos países latinoamericanos, entre ellos Cuba. Estos programas y las becas para estudiantes estaban patrocinados por la División de Cooperación Cultural del Departamento de Estado.

El *curriculum* de Mario Rodríguez Ramírez fue considerado satisfactorio por la comisión de otorgamiento y, en efecto, resulta aceptado para matricular en un curso de dos años y titularse como *Master of Arts in Meteorology*, en la Universidad de California (10). En aquella misma universidad también recibió y aprobó un curso especializado para meteorólogos profesionales que concluyó en los primeros días de agosto de 1946 (11). Durante su estancia en la ciudad de Los Angeles (1946-1947) residió en la propia sede del Servicio Meteorológico local; esto le proporcionó la posibilidad de visitar importantes centros científicos; entre otros el

observatorio astronómico de Lick, en Mount Hamilton, y el observatorio de Mount Wilson (12).

Antes de concluir su visita a los Estados Unidos, Rodríguez completó satisfactoriamente un período de entrenamiento para el pronóstico de huracanes, de 14 meses de duración (13). Este adiestramiento, efectuado en el *Weather Bureau*, concluyó en febrero de 1947. Tras su retorno a Cuba, ya diplomado, resulta ser el profesional mejor calificado y con una formación académica más completa dentro del servicio meteorológico cubano, solo aventajado por el ingeniero Millás que contaba entonces con 30 años de experiencia en esa actividad.

### **Labor docente de Mario Rodríguez Ramírez**

Deseoso de transmitir y aplicar en Cuba los conocimientos adquiridos, a partir de ese momento Rodríguez participa activamente en la organización y desarrollo de diversos cursos de instrucción teórica y práctica que fueron programados por el Observatorio Nacional para formar observadores meteorológicos. Esta labor la complementaba con reuniones nocturnas, realizadas en su propio domicilio, donde adiestraba y ejercitaba a un buen número de sus colegas en el dominio de las Matemáticas y la Física, los nuevos métodos de análisis de los mapas sinópticos y el estudio de otras disciplinas vinculadas con la ciencia del tiempo (14).

Antes, en 1938, Mario Rodríguez Ramírez había participado como profesor en el primer curso de formación de observadores meteorológicos que había auspiciado el Observatorio. En este programa de nivel elemental, de unos 6 meses de duración, enseñó diferentes asignaturas relacionadas con los procesos físicos de la atmósfera terrestre y con el manejo y lectura de los instrumentos meteorológicos (15). Rodríguez interviene también en las subsiguientes versiones de aquel curso que, mejorado y ampliado, se impartió en el Observatorio entre los años 1947 y 1948. En aquellas aulas se graduaron jóvenes marineros cuya bien definida vocación los llevó a permanecer trabajando ininterrumpidamente en el Servicio Meteorológico Nacional.

Hacia 1950 imparte un nuevo curso para la formación de meteorólogos, de 2 años de duración; y entre 1953 y 1957 labora además como profesor de Meteorología General en la Academia Nacional de Patrones (16).

Posteriormente, la Academia Naval del Mariel solicita sus servicios como docente para los cursos regulares que allí se ofrecen. En este centro enseña Meteorología Marítima durante dos períodos de 4 y 3 años de duración respectivamente: el primero entre 1954 y 1958, y el segundo entre 1960 y 1963. Es necesario aclarar que desde que comenzó a trabajar en el Observatorio Nacional, Mario Rodríguez no dejó de ofrecer apoyo, fuera de la docencia formal, a cuantos colegas se le acercaban en demanda de sus conocimientos y su ayuda para adentrarse en el estudio de cualquier asunto relacionado con la Meteorología.

Como se verá después, el período más fecundo y pleno de su magisterio tendrá lugar entre 1964 y 1977, como resultado de la diligente y acertada labor desplegada por él en la Escuela del Instituto de Meteorología

### **En el Observatorio Nacional**

No fue una tarea sencilla para Rodríguez cambiar los métodos de trabajo existentes en el Observatorio Nacional por entonces (1940 - 1960), en particular aquellos que se relacionaban con la elaboración y el análisis de los mapas del tiempo (17). Era grande el peso de una tradición de más de 30 años en el trazado de mapas sinópticos convencionales que se

confeccionaban sólo una vez al día, y que ya habían quedado atrás en muchos países de Europa y en particular en los Estados Unidos.

Por ello, correspondió al Dr. Mario Rodríguez Ramírez la delicada y parsimoniosa tarea de implantar poco a poco los nuevos procedimientos de predicción. Inicialmente, se cuenta, el trabajo con los nuevos métodos aprendidos en los Estados Unidos debió realizarse prácticamente en secreto (18) a fin de no crear serios problemas internos, teniendo en cuenta el hecho de que el Observatorio Nacional era un centro sujeto a una estricta disciplina militar y que el propio Rodríguez, incluso, ostentaba el grado de teniente de navío.

Simultáneamente con las tareas que realizaba como subdirector del Observatorio Nacional, Rodríguez Ramírez prestaba servicios a la Compañía Cubana de Aviación en el Aeropuerto Internacional de Rancho Boyeros (hoy José Martí) como meteorólogo pronosticador para la aeronáutica (19). Este trabajo lo desarrolló por espacio de 15 años (1951 — 1966). En 1962 fue ascendido al cargo de jefe de este departamento, hasta que en 1966 —debido a sus altas responsabilidades en el Servicio Meteorológico Nacional—, fue liberado de dichas funciones.

En efecto, el 20 de febrero de 1962 el Gobierno Revolucionario, mediante la Ley 1011, crea la Comisión Nacional de la Academia de Ciencias (20) bajo la dirección del Dr. Antonio Núñez Jiménez. Este organismo tendrá la misión de reformular la política científica del país y fundar diversos institutos de investigaciones. En 1963 el Dr. Núñez Jiménez le nombra para dirigir el “Grupo de Trabajo de Meteorología y Astronomía” de la C.N.A.C. (21). Al asumir estas funciones participó en las primeras gestiones para desarrollar un acelerado proceso de colaboración con el Servicio Hidrometeorológico de la Unión Soviética.

El 4 de mayo de 1964, la C.N.A.C. emite la Resolución no. 84, por medio de la cual se crea un Departamento de Meteorología en aquel organismo (22). El Dr. Mario Rodríguez Ramírez es designado como jefe de este Departamento. Desde ese importante cargo tuvo Rodríguez la responsabilidad de proyectar y ejecutar el montaje de un gran conjunto de 50 nuevas estaciones meteorológicas localizadas en todo el país. Además de ello asumió la tarea de dirigir e impartir clases en la Escuela de Meteorología de la Academia de Ciencias, donde se formaba al personal que estaría vinculado al funcionamiento de las estaciones que se pensaba instalar. El Departamento de Meteorología de la Academia de Ciencias fue uno de los centros que más tarde se fundiría con el Observatorio Nacional para dar lugar a la creación del Instituto de Meteorología (23)

### **Análisis preliminar de los aportes científicos del Dr. Mario Rodríguez Ramírez a la Meteorología Tropical en Cuba**

El Dr. Rodríguez Ramírez realizó su labor fundamental dentro de la Meteorología cubana, en el intervalo comprendido entre los años 1956 y 1976. Si realizamos un análisis del período histórico durante el cual transcurrió la vida del Dr. Rodríguez Ramírez y de los resultados que se derivaron de su labor creadora, se observará la indiscutible influencia ejercida en su formación científica por la llamada “Escuela Noruega” o “Escuela Escandinava de Meteorología”. A ello debe añadirse la fuerte influencia de los meteorólogos e investigadores norteamericanos de la primera mitad del siglo XX.

Efectivamente, a partir de 1895 la acelerada publicación de trabajos enmarcados en el campo de la entonces llamada “Meteorología Teórica” produjo cambios trascendentales en esta ciencia. Es importante señalar que hasta ese momento los investigadores especializados no constituían un grupo importante entre los estudiosos de la atmósfera (24). Incluso, en una

buena parte de los casos, los resultados derivados de los trabajos teóricos desarrollados por aquellos científicos no fueron llevados a la práctica sino bastante tiempo después.

Esta situación comenzó a modificarse con rapidez desde el último decenio del siglo XIX; a partir de entonces se produjo un cambio radical en el panorama de las ciencias de la atmósfera y el océano. Así, ya en el siglo XX, van apareciendo en acelerada sucesión nuevos trabajos sobre Meteorología Dinámica, Meteorología Sinóptica y Termodinámica, por sólo citar algunos, y surgen en apretada sucesión la Teoría de los Frentes (1918), la Teoría Ondulatoria de los Ciclones, los nuevos métodos de pronóstico a partir del análisis de las masas de aire y los frentes, el Análisis Isentrópico y el Pronóstico Numérico (1922). A los nombres de Bjerknes Rossby y Petterssen, se suman los de Depperman, Byers, Shaw, Bowie, Mitchell, Cline y otros no menos brillantes y conocidos a ambos lados del Atlántico, investigadores que introdujeron cambios de alta significación en la ciencia de los meteoros. Rodríguez, que había leído y estudiado profusamente casi la toda la bibliografía relacionada con estos meteorólogos, sentía una especial admiración por la obra desarrollada por Wilhem Bjerknes (1862 - 1951) (25); un reflejo de ello puede apreciarse en el contexto de su “Teoría Vorticial de los Huracanes” (26).

Mario Rodríguez Ramírez dedicó 23 años de su vida al proceso de generar, desarrollar y aplicar la “Teoría Vorticial de los Huracanes”. Como él mismo señala, la génesis del primer conjunto de ideas en torno a su modelo aparece en forma elemental hacia los primeros días del mes de octubre de 1954 (27), cuando se hallaba enfrascado en el pronóstico del huracán “Hazel”.

Aquellas prenociones de su hipótesis fueron entonces aplicadas a la predicción de varios ciclones tropicales ocurridos después durante los años 1955 (“Connie” y “Diana”) y 1956 (“Betsy”, “Carla”, “Dora” y “Greta”), cuyos resultados aparecen publicados por vez primera en la *Revista Cubana de Meteorología* en 1957 (28).

Aquel mismo año, Rodríguez había expuesto las bases de su hipótesis en los Estados Unidos de América. Conocedores de la existencia de aquel trabajo, algunos meteorólogos norteamericanos invitaron a Rodríguez a exponerlos en la sede del *U.S. Weather Bureau*, en Washington, y en la base naval de Norfolk, Virginia, lo que aconteció en efecto en febrero de 1956 (29). A su regreso a Cuba, un mes después, Rodríguez presentó aquel estudio en la sede del Observatorio del Colegio de Belén, durante el transcurso de una sesión de la Asociación Cubana de Aficionados a la Meteorología (A.C.A.M.) (30).

La Teoría tuvo su período de mayor auge durante la década de los años sesenta, cuando devino uno de los instrumentos fundamentales para el pronóstico de los huracanes en el Instituto de Meteorología. Durante el intervalo antes citado (1956 - 1976), Rodríguez expuso el resultado de sus investigaciones en más o menos una decena de países de Europa y América (31). En 1968 apareció una versión más completa de la Teoría Vorticial en el primer número de la *Serie Meteorológica*, una de las numerosas publicaciones consecutivas de la Academia de Ciencias de Cuba editadas durante esa época.

A principios de la década de los años sesenta, el Dr. Mario Rodríguez Ramírez participó en la instalación y puesta a punto de una estación para la observación y seguimiento de satélites artificiales —la primera existente en nuestro país—, emplazada en el Capitolio Nacional, sede de la Academia (32). De la misma manera contribuyó al montaje del primer Planetario *Carl Zeiss* adquirido por Cuba; un equipo de fabricación alemana (R.D.A.) nuevo en su clase en la

Ciudad de La Habana, que comenzó a prestar sus servicios en 1964 en el entonces Museo de Ciencias Naturales “Felipe Poey”.

En 1963, la Academia de Ciencias da los primeros pasos para materializar el desarrollo de programas de colaboración con la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas en la esfera de la Meteorología. Con este objeto se produce la visita a Cuba del Dr. Nicolai Russin (33). Rodríguez Ramírez tomó parte activa en la realización de aquellos primeros encuentros y la subsiguiente concreción de los acuerdos que de él se derivaron.

En 1965, la Comisión Nacional de la Academia de Ciencias —mediante su Resolución no. 24—, funda el actual Instituto de Meteorología, y recibe de la Marina de Guerra Revolucionaria el control estatal del servicio meteorológico nacional. Así, Rodríguez participa como eficaz protagonista de la importante reorganización del Servicio Meteorológico cubano acaecida entre 1965 y 1967, proceso que culminó confiriéndole un nivel científico superior a la ciencia del tiempo en nuestro país.

Un elemento de esencial importancia en la obra de Mario Rodríguez Ramírez es el ingente esfuerzo que desplegó en la creación en 1965 de la Escuela del Instituto de Meteorología (34). Este empeño dejó atrás a la época de los breves cursos de limitado alcance que hasta entonces se habían impartido en el Observatorio Nacional.

El sustento pedagógico de la Escuela de Meteorología descansaba sobre la base del importante nexo que debe existir entre el estudio y el trabajo. En esta escuela, los alumnos llevaban de conjunto el aprendizaje teórico y la actividad laboral práctica. La primera promoción de meteorólogos de nivel superior egresó en 1968 (35). En 1987 se habían graduado allí 75 meteorólogos del nivel I (superior), 68 de nivel II, 224 de nivel III (auxiliares) y 347 de nivel IV (observadores) (36). Un número significativo de excelentes meteorólogos que actualmente laboran en el Servicio Meteorológico Nacional y en otros centros científicos, proceden de aquella Escuela.

Como parte de los importantes acontecimientos ocurridos a partir de 1965, el Dr. Rodríguez Ramírez participó en el proceso de montaje de 2 radares meteorológicos modelo *Decca-42*, previamente adquiridos durante los años 1964 y 1965 en el Reino Unido (37). Estos equipos fueron en su momento un elemento de importancia para el estudio de las nubes, la lluvia, y en particular para la predicción de los ciclones tropicales. Paralelamente, se iban definiendo un conjunto de aspectos de relevante interés científico como temas de investigación para los especialistas del Instituto.

Un logro de singular importancia para la Meteorología cubana tiene lugar en las postrimerías de la década de los años sesenta, cuando entra en funcionamiento la primera estación existente en nuestro país para la recepción de fotografías de satélites meteorológicos (38). Este equipo, de procedencia soviética, fue recibido en Cuba bajo el auspicio de los programas para el desarrollo de la Meteorología que ya habían sido suscritos con la Unión Soviética, y en los cuales el Dr. Rodríguez Ramírez desempeñó un importante papel. Esta primera estación receptora fue inaugurada oficialmente el 23 de marzo de 1969, coincidiendo con la celebración del “Día Mundial de la Meteorología” (39).

Años más tarde, en 1973, Rodríguez participó en el montaje y puesta a punto de otros 3 radares meteorológicos modelo *Mitsubishi RC-32 B*, más potentes y especializados en el seguimiento y estudio de los huracanes. Estos equipos llegaron a Cuba como parte del proyecto *Cuba-7*; un acuerdo suscrito entre el gobierno cubano y el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo

(PNUD) con vista a la ampliación y perfeccionamiento del Servicio Meteorológico Nacional (40). El 2 de agosto de 1974, aún siendo Rodríguez director del Instituto, entró en servicio una nueva estación receptora de fotografías de satélites meteorológicos, de fabricación alemana. Recibía imágenes de los ingenios espaciales situados en órbita circumpolar y operaba con una frecuencia de 6 recepciones cada 24 horas (41).

### **Rodríguez Ramírez: El Hombre, el Director**

De acuerdo con la opinión de sus hijas, Mario Rodríguez Ramírez fue un excelente padre que en mucho se preocupó por mantener una familia estable y espiritualmente sana (42). Austero, en el sentido más positivo, y exigente en el cumplimiento de los deberes del hogar, se ocupó permanentemente de la correcta educación y formación vocacional de sus hijas e hijo, 6 en total.

En casa muchas veces le ayudaron en la realización de experimentos de Física, casi siempre vinculados con demostraciones prácticas de alguno de los principios sobre los que se apoyaban sus teorías en relación con los fenómenos meteorológicos. Ellas guardan el vívido recuerdo de sus paseos dominicales con el padre... que invariablemente terminaban con una visita "al Observatorio" (43), adonde Rodríguez acudía aun en sus días de descanso para comprobar el buen orden y la eficacia del trabajo que allí se desarrollaba.

Aquellos los que le conocieron y fueron sus colegas, los que compartieron con él éxitos rotundos y pronósticos no cumplidos, tienen puntos de vista no siempre totalmente coincidentes en torno a los rasgos de la personalidad de Mario Rodríguez Ramírez. En general lo definen como un jefe positivamente exigente y celoso cumplidor de los procedimientos. Rodríguez se sentía responsable personal al más alto grado por los pronósticos elaborados en el Instituto.

A semejanza de Benito Viñes, S.J. y de Luis García Carbonell, de Mariano Gutiérrez-Lanza, S.J. y de José C. Millás, intervenía de manera directa en la elaboración y el análisis de los mapas del tiempo —incluso supervisando el ploteo de los datos y el trazado de las isobaras, por ejemplo—, y en la redacción de los boletines (44). Rodríguez, con exclusión de su alta responsabilidad en la dirección del Instituto de Meteorología, encabezaba también el grupo de meteorólogos pronosticadores.

Constituye un recuerdo recurrente en quienes le conocieron, el hecho de que en presencia de una situación meteorológica compleja —sobre todo si se trataba de ciclones tropicales en el área geográfica adyacente al archipiélago cubano—, Rodríguez convertía su oficina en una suerte de estado mayor. En ella trabajaba, y dormía algunas pocas horas, cuando las circunstancias le exigían no abandonar el Instituto (45). La consagración y la excelencia en el trabajo no eran para él simples conceptos formales, eran un verdadero estilo de vida y una convicción que le condujo a ser una figura de indiscutible prestigio y ejemplaridad ante sus subordinados y sus superiores.

El Dr. Rodríguez Ramírez hubo de enfrentarse a la difícil situación meteorológica creada por el huracán "Flora" en 1963; y más adelante a las ocasionadas por otros organismos tropicales como los huracanes "Cleo" (1964), "Alma" (1966) y "Camila" (1969), por sólo citar a 4 de los más notables.

Como resulta fácil inferir, los aspectos prácticos relacionados con el pronóstico y el estudio de los ciclones tropicales constituían una importante prioridad para Mario Rodríguez. Como consecuencia de ello, se dio a la tarea de crear una estructura especialmente dedicada a este fin.

De esta manera organizó un Departamento de Ciclonología Tropical que nucleó a un grupo de experimentados meteorólogos dedicados a realizar estas importantes funciones.

Rodríguez trabajó hasta 1977 en 35 temporadas ciclónicas y permaneció 12 años como director del Instituto de Meteorología, cargo que equivale al de jefe del Servicio Meteorológico Nacional cubano. Su régimen diario de trabajo se iniciaba muy temprano en la mañana, cuando llegaba al Instituto. Casi de inmediato se dirigía al Departamento de Pronósticos con el objeto de supervisar las tareas que allí se realizaban, en particular el mapa del tiempo, y observar las peculiaridades de la situación meteorológica existente (46). Poco después acudía a su despacho en la Dirección para atender a los asuntos de carácter oficial que sus responsabilidades traían aparejados, entre ellos la lectura de abundante correspondencia.

No faltaban las visitas a otros departamentos y, por supuesto, las ocupaciones relativas a la enseñanza que le imponía la Escuela de Meteorología. Aún le quedaba tiempo para observar y orientar el trabajo del personal administrativo, el de los mecánicos instrumentistas, el de los observadores de la estación, el del jardinero... y realizar una incursión por la carpintería (47), oficio que constituía en él una verdadera vocación a la que se entregaba con enorme satisfacción (48).

El Dr. Mario Rodríguez Ramírez fue, entre otras importantes responsabilidades, representante de Cuba ante la Organización Meteorológica Mundial, y miembro de una decena de sociedades científicas (49). Entre ellas cabe mencionar a la Sociedad Geográfica de Cuba y a la American Meteorological Society (1937); la Federación de Doctores en Ciencia y Filosofía (1941), la Sociedad Cubana de Ciencias Físicas y Matemáticas (1945), la Royal Meteorological Society y la British Interplanetary Society (1953); la Asociación Cubana de Aficionados a la Meteorología y la American Geophysical Union (1954). Rodríguez recibió la distinción de miembro de honor de la Sociedad Meteorológica de Cuba (1993) y de la Sociedad Cubana de Física. Mario Rodríguez Ramírez fue condecorado con la Orden Nacional "Carlos Juan Finlay", en virtud de su extensa y sobresaliente trayectoria científica.

Al cesar en sus funciones como director del Instituto de Meteorología (julio 21 de 1977) continuó trabajando en diferentes temas de investigación relacionados con la Meteorología Tropical, en particular con los huracanes. Participó como asesor en diversos proyectos de investigación, como ponente y delegado en congresos y reuniones de carácter técnico, como tutor y consultor en las tesis de grado científico, y escribió y publicó artículos de divulgación en la conocida revista cubana *Juventud Técnica*. Rodríguez no pudo, en cambio, legarnos la inestimable riqueza de sus memorias a través de una obra expresamente elaborada con este fin.

Mario Rodríguez Ramírez murió en La Habana el domingo 15 de diciembre de 1996. Los que le conocimos al final de su vida recordamos sus intervenciones en los congresos internacionales sobre Meteorología y Ciclonología Tropical realizados durante 1993 y 1995, en los cuales, con su pulido verbo de siempre, aportó sus explicaciones colmadas de anécdotas y de extensas y pormenorizadas referencias a los grandes acontecimientos de aquella ciencia que él mismo ayudó a forjar.

## Referencias

1. Juzgado Municipal y Registro Civil de Manzanillo. *Certificación de nacimiento de Mario Emilio Rodríguez Ramírez*, agosto 10 de 1914, asentada en el folio 353, tomo 30. Expedida por el Dr. Francisco Gutiérrez Núñez, en Manzanillo, 24 de septiembre de 1928.
2. Rodríguez Ramírez, M. E.. Comunicación personal (mar. 1995).

3. Universidad de La Habana, Archivo Central, Fondo: Archivo Histórico Corriente (1900 — 1959). *Expediente académico no. 32 389 correspondiente a Mario Emilio Rodríguez Ramírez*
4. loc. cit.
5. Academia de Ciencias de Cuba. *Expediente Científico del Dr. Mario Emilio Rodríguez Ramírez*. Instituto de Meteorología, La Habana.
6. Universidad de La Habana. *Exp. Acad. M. E. Rodríguez Ramírez*
7. Rodríguez Ramírez, M. E.. Com. pers. (mar. 1995).
8. Academia de Ciencias de Cuba. *Exp. Cient. del Dr. M. E. Rodríguez Ramírez*. Instituto de Meteorología, La Habana.
9. loc. cit.
10. loc. cit.
11. loc. cit.
12. Rodríguez Ramírez, M. E.. Com. pers. (mar. 1995).
13. Academia de Ciencias de Cuba. *Exp. Cient. del Dr. M. E. Rodríguez Ramírez*. Instituto de Meteorología, La Habana.
14. Almaguer, E., comunicación personal (nov. 1997).
15. Academia de Ciencias de Cuba. *Exp. Cient. del Dr. M. E. Rodríguez Ramírez*. Instituto de Meteorología, La Habana.
16. loc. cit.
17. Martínez Cantero, R.. Comunicación personal (feb. 1998).
18. Almaguer, E.. Com. pers. (nov. 1997).
19. Academia de Ciencias de Cuba. *Exp. Cient. del Dr. M. E. Rodríguez Ramírez*. Instituto de Meteorología, La Habana.
20. Pruna, P.M., (1994): Cronología. Hechos históricos relacionados con la ciencia y la tecnología acaecidos en La Habana 1521-1988. Editorial Academia, La Habana, pp. 55-57.
21. Rodríguez Ramírez, M. E.. Com. pers. (mar. 1995).
22. República de Cuba, Gaceta Oficial, martes 21 de Septiembre de 1965, año LXIII (número extraordinario), p. 456, *Resolución no. 24 de la Comisión Nacional de la Academia de Ciencias*, Resuelvo I. La Habana
23. loc. cit.
24. Petterssen S. (1947): Introducción a la Meteorología. Editorial Espasa Calpe S.A., Buenos Aires. 347 pp.
25. Rodríguez Ramírez, M. E. (1960): "Wilhem Bjerknes, genio de la Meteorología", Finlay. Revista médico-histórica cubana (pp. 5 - 18) jul. - dic., La Habana.
26. Rodríguez Ramírez, M. E. (1968): Teoría Vorticial de los Huracanes. Serie Meteorológica, no. 1. Academia de Ciencias de Cuba, Instituto de Meteorología, La Habana. (43 pp.).
27. loc. cit. (p. 3).
28. Rodríguez Ramírez, M. E. (1957): "Conclusiones de la aplicación de la nueva hipótesis sobre los huracanes a la temporada de 1956". Revista Cubana de Meteorología, Vol. III, nos. 1 - 4 (pp. 66 - 68), La Habana.
29. Rodríguez Ramírez, M. E. (1957): Una hipótesis sobre los huracanes. Revista Cubana de Meteorología, Vol. III, nos. 1 - 4 (pp. 34 - 50), La Habana.
30. loc. cit.
31. Academia de Ciencias de Cuba. *Exp. Cient. del Dr. M. E. Rodríguez Ramírez*. Instituto de Meteorología, La Habana.
32. loc. cit.
33. González Montoto, J.. Comunicación personal (nov. 1995).
34. Rubiera Torres, J. M.. Comunicación personal (feb. 1998).
35. González Montoto, J.. Com. pers. (nov. 1995) y J. M. Rubiera Torres. Com. pers. (feb. 1998).
36. Ortiz, R. (1987): "Reseña histórica de la Meteorología en Cuba", Conferencias y estudios de Historia de la Ciencia y la Tecnología. CEHOC, Academia de Ciencias de Cuba, La Habana (13 pp.).
37. Ramos Guadalupe, L. E., 1995 (inédito), "Evolución Histórica de la Meteorología en Cuba. Cronología". Instituto de Meteorología. La Habana.
38. loc. cit.
39. Núñez, O.. Comunicación personal (nov. 1995).
40. González Montoto, J. y O. Núñez. Com. pers. (nov. 1995).
41. Núñez, O.. Com. pers. (nov. 1995).
42. Rodríguez Masó, S.. Comunicación personal (feb. 1998).
43. ibidem.
44. Rubiera Torres, J. M.. Com. pers. (feb. 1998).
45. Almaguer, E. Com. pers. (nov. 1997) y R. Martínez Cantero. Com. pers. (feb. 1998)
46. Martínez Cantero, R.. Com. pers. (feb. 1998).
47. ibidem
48. Rodríguez Masó, M. L.. Comunicación personal (feb. 1998).
49. Academia de Ciencias de Cuba. *Exp. Cient. del Dr. M. E. Rodríguez Ramírez*. Instituto de Meteorología, La Habana.

## National Hurricane Center Progress, Objectives and Goals

*Jerry D. Jarrell*

*National Hurricane Center, Tropical Prediction Center  
11691 SW 17th, Miami Florida 33165-2149, USA*

**Introduction:** For several years the National Hurricane Center has been wrestling with the problem of setting goals, and the general area of documenting progress. NOAA has, in the last few years, set an accuracy goal for tropical storm and hurricane “warning” forecasts. This is the set of forecasts that in the advisories which announced warnings. While the intent is good, in real life, this goal falls short for several reasons. First, it neglects all of the other forecasts, such as those which lead ships at sea to avoid the hurricane. It also does not measure the equally valuable forecast upon which a decision was made not to post a warning. Additionally, since there is typically only three, or less, landfalls per year, the resulting means are invariably based on small, and inherently unstable, numbers, making it difficult to demonstrate statistical significance in a trend. Finally, it only measures track forecast accuracy, and ignores the other forecast characteristics of the tropical cyclone, such as intensity, and size. This paper looks at several measures of skill, and suggests possible goals for the National Hurricane Center.

**Track Forecasts.** Track is clearly the most important parameter NHC forecasts, because if the track is wrong, not only are the other parameter forecasts likely to be negatively influenced, but one can argue that if you don’t know where it’s going to hit, what difference does it make how strong it is etc. The point is well taken, even though it does make a difference at some level. For example, in the US, the Federal Emergency Management Agency can pre-position supplies in a section of the country to be ready for a strike anywhere within a broad area without knowing specifically where landfall and the destruction will occur.

Historically, NHC has issued a hurricane warning about 24-h in advance. *Ideally, one would want to warn only the area that will actually experience hurricane force winds, but as will be seen later, the NHC has virtually no skill in forecasting the width of the hurricane wind swath. The NHC actually covers a much larger area to allow for track and size forecast errors.* On average, the width of the warning zone has been about 300 nmi, and it is usually centered near the forecast landfall point. Now, for simplicity, starting with a “centered 300 nmi area” as given, one can deduce a measure of accuracy. If the (along the coast) error in the landfall forecast is greater than 150 nmi, then less than half of the area warned coincides with the area that would have been warned if the track forecast were perfect. One can interpret this as more wrong than right, or “misleading.”

Now a reasonable (but perhaps unattainable) goal is to completely eliminate these misleading forecasts. It is perhaps no coincidence that 150 nmi is 1½ times the 100 nmi figure usually accepted as a historic 24 h average forecast error. Because of this (albeit weak) relationship there is some connection between the 150 nmi figure and what is now meteorologically possible. Therefore as a first guess, 150 nmi is a fairly reasonable upper limit on utility (24 h forecasts worse than that tend toward useless) and what is scientifically possible (the state of the art should limit all but a few forecasts to errors in excess of 150 nmi).

Beyond 24 h the scientific and utilitarian goals diverge. For the same reasons as at 24 h, forecasts with an error greater than 150 nmi tend toward the useless regardless of lead time since they are simply alerting some of the wrong area and some of the wrong citizens. On the other hand, the absolute accuracy that is scientifically possible absolutely diminishes with time. In fact, a reasonable upper limit on our worst forecast errors grows approximately linearly with time, (e.g. 225 nmi at 36 h, 300 nmi at 48 h etc.)

A test was conducted of forecasts issued since 1991 to see what has been NHC's track record relative to what is "meteorologically possible" (forecast errors less than a time-sliding scale) and relative to what is "useful" (less than an absolute scale) as defined above. Table 1 illustrates the record.

If we focus for a moment on the left half of Table 1, no trends are obvious. The chance of exceeding the threshold seems rather high. If there is any thing to be learned, it is that the numbers vary considerably from year to year. There is a trend toward improvement in that the ratio of the number of times the average is exceeded in the last three years compared to the first three years, is 11:5, clearly progress.

The percentage of useful forecasts, as shown in the right side of Table 1 is a bit of a different story. Certainly the standard is not too low from an attainability perspective. On the other hand, it is disconcerting to note that only 6% of the 3-day forecasts were, in this rather restrictive terminology, useable in 1991, or that only 30-35% of those were useable in the most recent three years. What is encouraging is that progress is evident. It is also clear that progress is prominent where it is needed most, in the longer range forecasts.

Table 1. Percentage of NHC forecast errors less than certain threshold values.

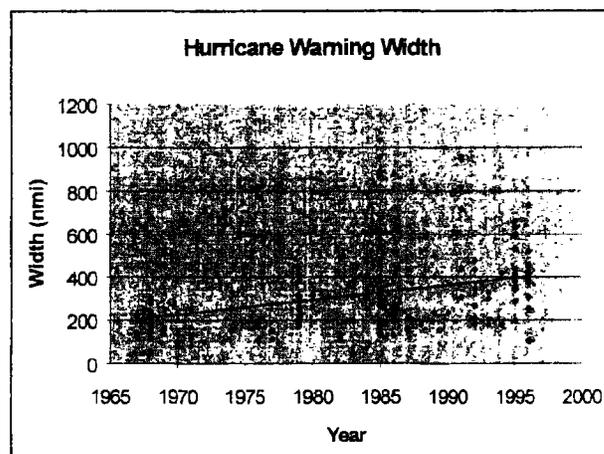
Criteria	Acceptable Meteorological Forecasts (%)				Useable Forecasts (%)			
	24h	36h	48h	72h	24h	36h	48h	72h
	<150 nmi	<225 nmi	<300 nmi	<450 nmi	<150 nmi	<150 nmi	<150 nmi	<150 nmi
1991	75	83	94	94	75	57	29	6
1992	90	91	91	88	90	67	52	15
1993	70	88	88	93	72	57	48	22
1994	75	83	82	84	75	65	33	12
1995	88	91	92	94	88	69	50	30
1996	96	98	98	98	96	81	61	35
1997	81	91	96	97	81	67	50	32
Average	82.4	87.7	91.6	92.6	82.4	66.1	46.1	21.7

Over the past several years as various models, primarily the statistical models, were developed and discarded. During that period there was a suspicion that good forecasts were being improved more than the bad forecasts. Table 1 seems to suggest that since 1991 the bad forecasts (either meteorologically or utility-wise) have been improved most. This is a tribute to the numerical models that catch the major track changes, and some of the stalls and loops that lead to the bad forecasts.

**Hurricane Warnings:** One other aspect of the forecasts closely related to track forecasts are warnings. Earlier it was stated that “on average, the width of the warning zone is about 300 nmi.”

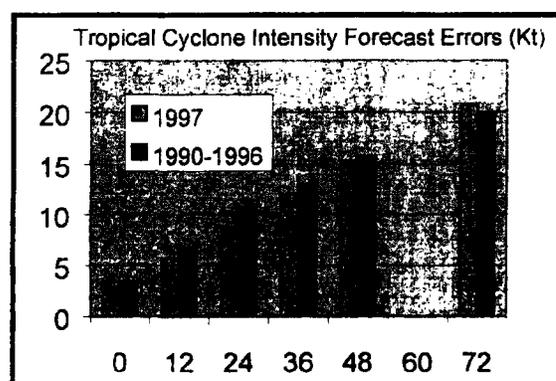
This statement is indirectly based on a study from the 1960s, and is still considered reasonably valid. DeMaria and Pennington (1998) actually measured the width of all hurricane warnings issued by the National Hurricane Center from 1967 onward. They found an average width of 328 nmi. The plot of these warning widths, with a trend line is shown in Figure 1. The trend line indicates that the width of hurricane warnings has increased over the time period in question, and suggests that the change from the earlier 300 to 328 nmi is real, and that it is currently probably even larger. One can ask, why should the warning width get larger while forecasts have improved?

There may be several possible answers to this very important question. One possible explanation is that the large numbers come from those hurricanes paralleling the coast, primarily the US East Coast, and therefore the trend is somewhat dependent on happenstance, and is dominated by a few recent cases. However, a much more larger contributing factor may be that NHC has been under fairly heavy pressure to issue hurricane warnings earlier, and has responded by increasing the lead time. Since deciding what areas to cover with warnings is subjective, it is reasonable that with earlier warnings, the same forecaster comfort level is achieved with a broader area.



*Figure 1. Scatterplot of 30-years of Hurricane Warning Widths, with trend line.*

**Intensity Forecasts:** It should be pointed out that NHC rarely has a good estimate of the actual maximum sustained winds that occurred in a hurricane even long after the fact. In developing goals for the U.S. Weather Research Project, being able to estimate the initial value of the maximum sustained wind to within 10 kt was regarded as a reasonable long term goal. The fact that goals are some distance removed from present reality, suggests that the state of estimating “nowcast” maximum wind speeds is drastically deficient. Additionally, a long term goal is to forecast the maximum sustained winds when a warning is issued (about 24 h lead time) accurate to within one category on the Saffir-Simpson Hurricane Scale (SSHs). SSHs Categories are either 15 or 20 kt wide. Gross (1997) has verified NHC tropical cyclone intensity forecasts, but recall that the verification standard, the “best track” estimate of maximum sustained winds is itself subject to an unknown (but non-negligible) error. A comparison of 1997



*Figure 2. Verification of 1997 Atlantic Tropical Cyclone Intensity Forecasts, Errors (kt)*

intensity forecast errors is shown in Figure 2. Notice that if the “truth” were perfectly known, then both of above goals would be achieved in the mean, because the 0-h and 24-h average error are well below the 10 kt and one SSHS category goal respectively. Since the truth is not well known, there is an unknown component of average error not measured (or reported) in Figure 2. Additionally, it is not known how often NHC achieves these goals in individual forecasts. The 1997 averages were generally slightly better than the previous average error since 1990. The NHC is not confident that significant skill is evident in these forecasts, over that of persistence and climatology.

**Structure Forecasts:** The term structure is generally used to describe the three-dimensional distribution of winds within the tropical cyclone. The part of structure which NHC forecasts is the surface radius of 34, 50, and 64 kt winds. In particular, a single value for these radii are provided for each of the four quadrants (NE, SE, SW, NW), and in fact the number provided in the advisories, is the largest value of the radius anywhere within the quadrant. This is true both for the initial condition and forecasts. Lawrence (1998) conducted a study to try to establish how accurate such forecasts are. That study involved a sample of 62 radii forecasts from recent NHC advisories, and verified these against known marine buoy platform reports of opportunity. The results for the 34-kt radius are shown in Table 2. The findings are tentative, because of the small sample size, but nonetheless are suggestive of trends that are not unexpected. The most obvious finding is that NHC over forecasts the radii, as shown in the large positive bias in the errors. To some extent this is caused by applying the maximum radius in a quadrant to the entire quadrant, and additionally, NHC may also be allowing positively for error (over forecasting).

Forecast Period	0	12	24	36
Mean Algebraic Error (Bias)	28	26	18	9
Mean Absolute Error	43	44	39	37
Number of Cases	62	52	55	42
Mean Absolute Error using mean as the Forecast	41			

Another finding that is not surprising is that the NHC forecasts are without (or nearly without) skill. This is shown by the lower average error obtained by simply substituting the sample mean for the forecast. Another indirect indication of a lack of skill is the apparent absence of degradation of forecasts at longer time intervals. Although none of these findings are statistically significant, they are consistent with several years of subjective evaluation at NHC. While not shown here, similar results were found for 50-kt and 65-kt wind radii, except the sample sizes were even smaller.

**Goals:** The objective of the NHC always has been to do the best job possible. It has also been to reduce the forecast errors. Curiously, these two important goals are sometimes at odds. Frequently the situation arises where one guidance model suggests a drastic change in the forecast track. NHC follows a forecast policy that puts great value on consistency and almost never altering a track only to go back to the original a few hours later. That undesirable oscillation is often described as the “windshield wiper” effect. To avoid this a “paradigm of successive small alterations” is applied which sometimes leads NHC to be behind major track changes, but it also nearly assures that it will never take down a warning and have to put it right back up. In that unacceptable case, an “all-clear” signal would have been sent, only to be followed by a reinstatement of the warning. The effectiveness of the warning could be diminished because the population might no longer be closely watching the situation. The net effect is that NHC will sometimes sacrifice what might be numerically a better forecast to maintain what is considered to be a better service.

Notwithstanding the above, it is reasonable to have goals, and some suggested goals for NHC are listed below (*Clearly, some of these goals have been met in the past, and they are arbitrary, but reachable, while they demand sustained progress*).

- Meteorologically acceptable accuracy in at least 90% of track forecasts. Meteorologically acceptable is defined as <150 nmi, 225 nmi, 300 nmi and 450 nmi at 24, 36, 48 and 72 h respectively.
- That track forecast be useful (that is, errors less than 150 nmi) in at least the following percentages: 90% at 24 h, 67% at 36 h, 50% at 48 h and 30% at 72 h.
- That the trend of the width of hurricane warnings begins to decrease, while the lead time remains the same or increases.
- That intensity forecast accuracy continues to exceed the most recent five-year average.
- That a baseline for verification of our wind structure forecasts be established.

**Summary:** It is clear that much progress has been made in the forecast accuracy at the National Hurricane Center, however, in some areas, particularly intensity and structure, much remains to be done. Establishing goals and measuring progress against those goals are necessary processes in improving track and intensity forecasts. Equally important is establishing baseline skill levels in posting warnings and in forecasting tropical cyclone structure as necessary first steps to improving these vital services.

Bibliography:

DeMaria, M., and J. Pennington, 1998: Verification of a 30-year sample of hurricane warnings issued by the National Hurricane Center. Minutes of the 52nd Interdepartmental Hurricane conf., OFCM, Silver Spring, MD, in press.

Lawrence, M., S. Houston, S. Spisak, and S. Murillo, 1998. A verification of National Hurricane Center forecasts of surface wind speed radii in hurricanes. Minutes of the 52nd Interdepartmental Hurricane conf., OFCM, Silver Spring, MD, in press.

## CLIMATOLOGIA DE LAS DEPRESIONES TROPICALES QUE HAN AFECTADO A CUBA DESDE 1920 HASTA 1993

*Roberto Ortíz Héctor*

Este trabajo fue concluido después de la dolorosa pérdida de su autor, por la Dra. Maritza Ballester y la Met. Daniela Arcia, quienes quisieron que el esfuerzo realizado por el mismo se diera a la luz.

**RESUMEN:** En este trabajo se realiza un estudio de carácter climatológico sobre las depresiones tropicales, que afectaron a Cuba durante el período 1920 - 1993. Se presentan las frecuencias mensual y anual de las depresiones para todo el país y por provincias, el tamaño medio por meses y las probabilidades mensuales de las direcciones de las trayectorias sobre Cuba y sus mares adyacentes.

**ABSTRACT:** In this work a climatologic study about tropical depressions that affected Cuba during 1920 - 1993 period, is realized. The frequencies by months and years for Cuba and by provinces, the monthly mean size and track direction monthly probabilities over Cuba and surrounding seas, are presented.

### **Introducción**

Como es conocido en nuestra zona tropical de observación, durante el período denominado temporada ciclónica (junio-noviembre), suelen presentarse las depresiones, organismos éstos que además del peligro que significa su posible tránsito a las categorías superiores (tormenta tropical o huracán) no dejan de ocasionar daños y trastornos a la economía nacional.

En un exámen a través del tiempo de más de 100 años, no es hasta 1909 que se comienza a usar en Cuba el vocablo depresión relacionado con fenómenos tropicales ( Carbonel, 1909 ). Más tarde Millás en 1949 plantea que: "la depresión es una simple baja barométrica, sus vientos no son fuertes y no tienen circulación definida. Va acompañada de cielos nublados, suelen dar algunas lluvias y pueden desfogar turbonadas en su seno". El mismo autor dice después (Millás, 1960): "La depresión es el organismo tropical más débil y se caracteriza por estas cosas: Baja barométrica ligera, casi todas las isobaras abiertas pero una o dos interiores estan cerradas; vientos flojos a frescos, con algunas direcciones anormales, como del sur al suroeste; no existe circulación ciclónica definida; los cielos tienen bastante nubosidad y hay algunas lluvias; pueden desfogar turbonadas".

Gutiérrez y Quiñones (1975) describen este organismo ciclónico como débil circulación cerrada con vientos de hasta 35 Km/h. Este límite se extendió hasta 62 Km/h ( según la clasificación de la Organización Meteorológica Mundial ) en la temporada ciclónica de 1980 y fué contemplada en el Plan Operativo sobre Huracanes del Instituto de Meteorología en 1982.

En la actualidad la clasificación adoptada es : "Primer estadio de un ciclón tropical constituido por un centro de bajas presiones delimitado al menos por una isobara cerrada y determinada estructura vertical en la troposfera baja. Los vientos describen una circulación ciclónica definida y pueden alcanzar una velocidad máxima media (media en un minuto) hasta 62 Km/h (33 nudos o menos)" (Plan Operativo de 1993).

La depresión tropical como fase inicial de la evolución de los ciclones tropicales, no presenta vientos muy fuertes, pero por lo general tiene asociada una extensa área de nublados con precipitaciones intensas. Estas lluvias resultan beneficiosas si ocurren sobre regiones, que se encuentran bajo períodos de sequías; pero si el movimiento sobre un área determinada es lento o se mantiene el sistema casi-estacionario pueden producir inundaciones. De ahí la importancia de conocer el comportamiento de estos sistemas meteorológicos.

En Cuba se elaboró una climatología de las depresiones tropicales para la región ciclogénica del Atlántico ( Ballester y Bosch, 1990; Ballester, 1995 ), sin embargo no se cuenta con una estadística de la influencia de estos organismos sobre ese país, por lo cual surge la necesidad de realizar el presente estudio.

### **Materiales empleados**

Para realizar el trabajo se consultaron los libros de registros de las observaciones meteorológicas y los mapas del tiempo del Instituto de Meteorología, correspondientes al período de 1920 - 1993, además de periódicos y revistas, fundamentalmente de antes de la década del 60. En la imposibilidad de obtener datos precisos de las distintas variables clasificatorias como la velocidad de los vientos, presiones centrales y circulación, se acepta y así se cataloga el organismo - de acuerdo con los mapas y los datos del mismo.

La afectación sobre el territorio cubano se determinó por el área de influencia de la depresión tales como las isobaras, las direcciones de los vientos, nefelismo y presiones. Es de interés señalar, que con este tipo de organismo muchas veces se producen grandes lluvias en puntos muy distantes al área que el ocupa y por ello en ese caso se requeriría de un estudio especial fuera del alcance de este trabajo.

### **Frecuencias mensual y anual**

El archipiélago cubano ha sido afectado por 51 depresiones tropicales durante el período de 74 años considerado, para un promedio de una cada 1.4 años. Al igual que para los huracanes y las tormentas tropicales, octubre es el mes de mayor afectación en el caso de las depresiones, alejándose significativamente del resto de los meses, los cuales presentan valores próximos, excepto julio en que la influencia es nula, según lo observado en la Tabla 1. También se aprecia que el máximo de frecuencia anual es tres, ocurriendo esto en los años 1959, 1969 y 1979; mientras que para un mes determinado es dos, producidos en octubre de 1951, 1956 y 1969, así como en agosto de 1985.

El período más prolongado (6 años) en que Cuba no ha sido afectada por depresión tropical alguna fué el comprendido entre 1939 y 1944. Otros dos períodos de interés son los de 1965 - 1968 y 1981 - 1984. Durante los años estudiados el 66.6% de las depresiones tuvieron siempre esa categoría, el 29.4% se convirtieron después en tormentas tropicales, un caso ( Frederic, septiembre de 1979) fue una tormenta antes y después cuando afectó las provincias occidentales, lo cual constituye el 2% y otro caso, el 2% restante, se correspondió con una tormenta en fase de debilitamiento ( Item, octubre de 1951 ).

### **Afectación por provincias**

Un desglose por provincias de las frecuencias se muestran en la Tabla 2. Aquí se aprecia, que a la región occidental, incluida la Isla de la Juventud, le corresponde la mayor ocurrencia en los dos primeros meses y los dos últimos, estando en junio excenta de esta influencia la región oriental. En agosto la afectación a las provincias orientales es ligeramente superior, mientras que en septiembre las provincias centrales presentan el máximo. En general, la parte occidental del país tiene la mayor afectación, con los valores máximos referidos a las provincias habaneras ( Fig. 1).

Las contribuciones de cada mes al total de depresiones que afectaron a cada provincia en el período estudiado se reflejan en la Tabla 3. Al respecto se tiene que, desde Pinar del Río hasta



Año	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Total
1966	0	0	0	0	0	0	0	0
1967	0	0	0	0	0	0	0	0
1968	0	0	0	0	0	0	0	0
1969	0	1	0	0	0	2	0	3
1970	0	0	0	0	0	0	0	0
1971	0	0	0	0	0	0	0	0
1972	0	0	0	0	0	0	0	0
1973	0	0	0	0	0	0	0	0
1974	0	0	0	0	1	0	0	1
1975	0	0	0	1	0	0	0	1
1976	0	0	0	0	0	0	0	0
1977	0	1	0	0	0	0	0	1
1978	0	0	0	0	0	0	0	0
1979	0	1	0	0	1	1	0	3
1980	0	0	0	0	0	0	1	1
1981	0	0	0	0	0	0	0	0
1982	0	0	0	0	0	0	0	0
1983	0	0	0	0	0	0	0	0
1984	0	0	0	0	0	0	0	0
1985	0	0	0	2	0	0	0	2
1986	0	0	0	0	0	0	0	0
1987	0	0	0	0	0	0	1	1
1988	1	0	0	1	0	0	0	2
1989	0	0	0	0	0	0	1	1
1990	1	0	0	0	0	1	0	2
1991	0	0	0	0	0	0	0	0
1992	0	0	0	0	0	0	0	0
1993	1	0	0	0	0	0	0	1
Total	8	7	0	8	6	16	6	51
%	15.7	13.7	0	15.7	11.8	31.3	11.8	

Tabla 2. Frecuencias anuales y mensuales de afectación por provincias, durante el período 1920 - 1993.

		MAYO															
Año	Día	Provincias Afectadas															Total
		PR	HA	CH	IJ	MA	VC	CI	SS	CA	CM	TU	GR	HO	S C	G T	
1920	27-28										X	X	X	X	X	X	6
1925	23-25	X	X	X	X	X											5
1937	24											X	X	X	X	X	5
1958	23-24	X	X	X	X												4
1960	31	X	X	X	X												4
1988	31-2	X	X	X	X	X	X	X	X	X							9
1990	24-25	X	X	X	X	X											5
1993	31	X	X	X	X	X	X	X									7
		6	6	6	6	4	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	

Tabla 2. (continuación)

JUNIO																	
Año	Día	Provincias Afectadas														Total	
		PR	HA	CH	IJ	MA	VC	CI	SS	CA	CM	TU	GR	HO	SC	GT	
1928	23	X	X	X	X												4
1929	9	X	X	X	X	X											5
1933	9	X	X	X	X	X											5
1964	5	X	X	X	X												4
1969	8-9	X	X	X	X	X											5
1977	1-3	X	X	X	X												4
1979	13							X	X	X							3
		6	6	6	6	3		1	1	1							
AGOSTO																	
Año	Día	Provincias Afectadas														Total	
		PR	HA	CH	IJ	MA	VC	CI	SS	CA	CM	TU	GR	HO	SC	GT	
1932	15-16		X	X		X	X										4
1936	12-14	X	X	X	X							X	X	X	X	X	9
1945	20-21						X		X	X	X						4
1947	18	X	X	X													3
1975	25										X	X	X	X	X	X	6
1985	12-13	X			X												2
1985	27-28						X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	10
1988	26											X		X		X	3
		3	3	3	2	1	3	1	2	2	3	4	3	4	3	4	
SEPTIEMBRE																	
Año	Día	Provincias Afectadas														Total	
		PR	HA	CH	IJ	MA	VC	CI	SS	CA	CM	TU	GR	HO	SC	GT	
1926	12-13	X	X	X	X	X	X	X	X	X							9
1937	25	X	X	X	X	X	X	X	X	X							9
1938	7-8		X	X		X	X	X	X								6
1959	21									X	X	X	X	X	X	X	7
1974	23-24	X	X	X	X												4
1979	6-9					X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	11
		3	4	4	3	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2	
OCTUBRE																	
Año	Día	Provincias Afectadas														Total	
		PR	HA	CH	IJ	MA	VC	CI	SS	CA	CM	TU	GR	HO	SC	GT	
1922	13-14	X	X	X	X	X	X	X									7
1929	20	X	X	X	X	X											5
1934	23	X	X	X	X												4
1945	13	X															1
1949	13											X	X	X	X	X	5
1951	9	X	X	X	X	X	X	X									7
1951	17	X	X	X	X	X											5
1953	7-8	X	X	X	X												4
1956	13-14		X	X		X	X	X	X	X							7
1956	31							X	X	X	X	X	X	X	X	X	8
1959	17	X	X	X	X												4
1961	17-18							X	X	X	X	X	X	X	X	X	8
1969	2	X	X	X	X	X											5
1969	17-18	X	X	X	X	X											5
1979	12-14	X	X	X	X	X	X	X									7
1990	8-9		X	X		X	X	X	X	X	X	X					9
		11	12	12	10	9	5	5	4	4	3	4	3	3	3	3	

Tabla 2.(continuación)

NOVIEMBRE																	
Año	Día	Provincias Afectadas															Total
		PR	HA	CH	IJ	MA	VC	CI	SS	CA	CM	TU	GR	HO	S C	G T	
1926	14-16	X	X	X	X	X											5
1938	7-10						X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	10
1959	21	X	X	X	X	X											5
1980	16	X	X	X	X	X	X	X	X								8
1987	2-3	X	X	X	X	X											5
1989	29-30	X	X	X	X	X											5
		5	5	5	5	5	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	

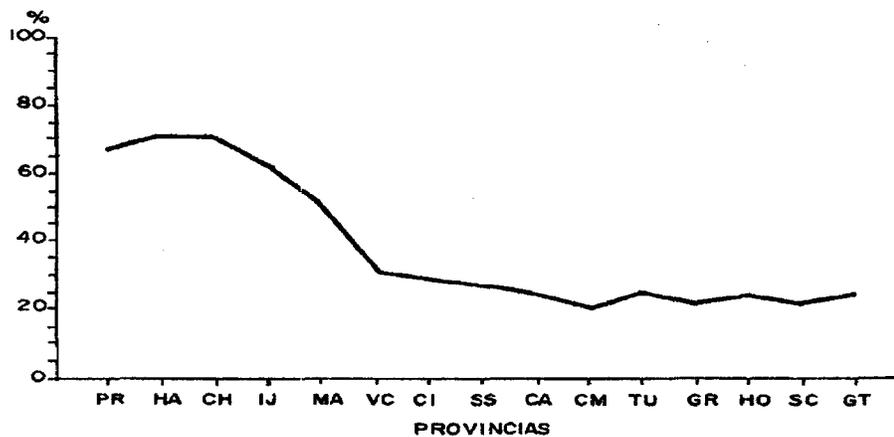


Fig. 1 Afectación de las depresiones tropicales a Cuba por provincias (1920-93).

Tabla 3. Contribuciones de cada mes al total de depresiones que afectaron a cada provincia (%) en el periodo 1920 - 1993.

Mes	PR	HA	CH	IJ	MA	VC	CI	SS	CA	CM	TU	GR	HO	SC	GT
Mayo	18	17	17	19	15	13	13	7	8	10	15	18	17	18	17
Junio	18	17	17	19	12	0	7	7	8	0	0	0	0	0	0
Julio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Agosto	9	8	8	6	4	19	7	14	15	30	31	27	33	27	33
Septiembre	9	11	11	9	15	25	27	29	31	20	15	18	17	18	17
Octubre	32	33	33	31	34	31	33	29	31	30	31	27	25	27	25
Noviembre	15	14	14	16	19	13	13	14	8	10	8	9	8	9	8

### Tamaño y movimiento

El promedio mensual del tamaño de las depresiones tropicales se determinó a partir de sus diámetros superficiales, atendiendo a la última isobara cerrada. Al respecto, se deduce de la Tabla 4, que los diámetros se incrementan hacia principios y fines de temporada, presentando el máximo en octubre. Dicha característica está determinada por la interacción de estos sistemas tropicales con las vaguadas de los oestes en las épocas de transición.

Tabla 4. Promedio mensual aproximado de los diámetros superficiales de las depresiones tropicales, atendiendo a la última isobara cerrada.

Mes	Diámetro (Km/h)
Mayo	693
Junio	404
Julio	---
Agosto	352
Septiembre	465
Octubre	776
Noviembre	618

Las probabilidades mensuales de las direcciones de las trayectorias sobre Cuba y mares adyacentes se muestran en la Fig.2. En mayo la dirección más probable es hacia el nordeste, mientras que en junio el movimiento abarca el sector noroeste - nordeste. La componente predominante en agosto es al oestenoroeste y en septiembre el sector de trayectoria se extiende más hacia el norte. En octubre éste se amplía al nordeste, con la probabilidad máxima hacia el norte. Ya en noviembre la traslación es variable, con una ligera tendencia al nordeste.

**Referencias**

Ballester, M. (1995): Las Depresiones Tropicales en la región del Atlántico Norte. Conferencia presentada en Taller Internacional sobre Ciclones Tropicales. Guadalajara,

----- y J. Bosch (1990): Climatología de las Depresiones Tropicales del Atlántico Norte durante el período 1967 - 1983. Revista Cubana de Meteorología. Vol.3, No.1, pp.1-12.

Carbonel, L.G. (1909) : Boletín Meteorológico y cosechas de Cuba. Boletín oficial de la secretaría de agricultura, comercio y trabajo. La Habana, p.396.

Gutiérrez, T. y Quiñones, J.V. (1975) : Terminología empleada en los pronósticos del tiempo. A.C.C., Instituto de Meteorología, 19 pp.

Millás, J.C. (1960) : Cursillo de Meteorología Elemental. Los organismos ciclónicos. Depresiones, perturbaciones ciclónicas y ciclones. Su traslación. Habana. 20 pp

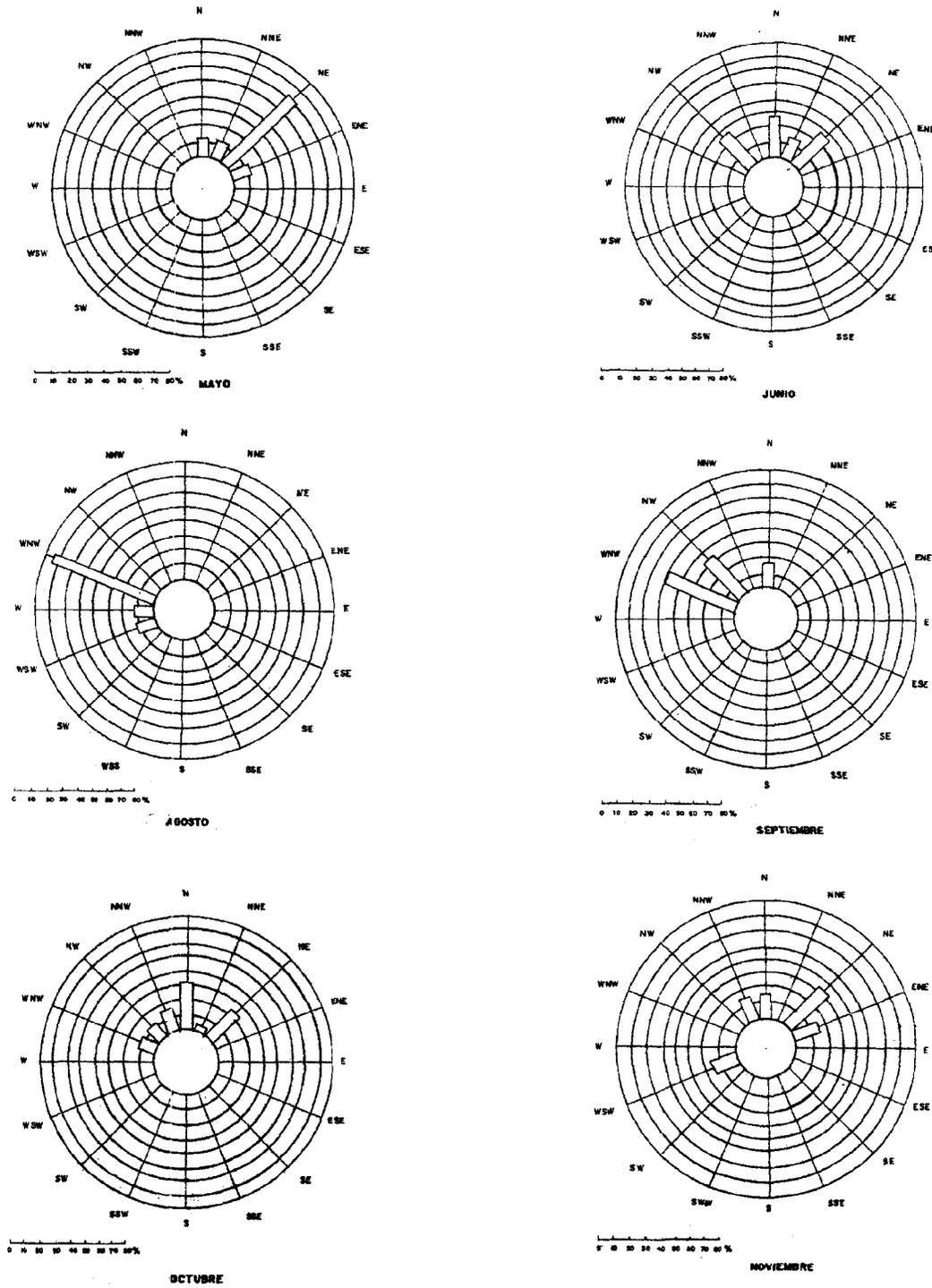


Fig.2 Probabilidades de las direcciones de las trayectorias de las depresiones tropicales sobre Cuba y mares adyacentes.

## Are We Entering an Active Era for Major Hurricane Activity?

by

Stanley B. Goldenberg, Lloyd J. Shapiro, and Christopher W. Landsea

<sup>1</sup>Hurricane Research Division/AOML/NOAA, 4301 Rickenbacker Cswy., Miami, Florida, 33149  
Email: <goldenberg@aoml.noaa.gov><landsea@aoml.noaa.gov>

<sup>2</sup>Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Ft. Collins, Colorado, 80523

**RESUMEN:** La cuenca Atlántica ha experimentado dos décadas de relativa tranquilidad en la actividad de huracanes durante los años de 1970 y 1980, especialmente en lo referente a los huracanes intensos que afectan los países de baja latitud. Por ejemplo la región del Mar Caribe fue azotada por 1,6 huracanes por año en las décadas de los cincuenta y los sesenta, comparado con el 0,7 por año durante el período (de poca actividad) de los setenta y ochenta. Estos cambios multidecadales en la actividad de huracanes del Atlántico son causados por las variaciones de la temperatura de la superficie del mar (TSM) del Atlántico y su impacto sobre la cizalladura vertical del viento, la estabilidad estática húmeda y el fortalecimiento del monzón del África Occidental (las precipitaciones en el Sahel Occidental). Actualmente existen fuertes indicaciones que se está entrando en una era de incremento en la actividad de huracanes intensos. Se tiene evidencia por los cambios experimentados en las TSM del Atlántico, la cizalladura vertical del viento y el propio carácter de los huracanes intensos. Estos cambios pueden haber comenzado a manifestarse a finales de los años ochenta, pero fueron enmascarados por la larga influencia de El Niño de 1991-1994. Sin embargo, durante 1995 y 1996 hay señales claras que los huracanes intensos han retornado, ya que se observaron 11 huracanes con esta categoría, el mayor número para dos años consecutivos según la muestra disponible. De aquí se concluye que las próximas dos décadas probablemente estén acompañadas por un régimen activo de huracanes para el Atlántico, quizás con profundos impactos para los países del Caribe, Centroamérica y Estados Unidos.

**ABSTRACT:** The Atlantic basin has experienced a two decade lull in hurricane activity during the 1970s and 1980s, especially true for the major hurricanes affecting the peoples of the low latitudes. For example, the region of the Caribbean Sea was afflicted by 1.6 hurricanes per year in the busy decades of the 1950s and 1960s, compared with just 0.7 per year during the quiescent period of the 1970s and 1980s. These multidecadal changes in Atlantic hurricane activity are caused by Atlantic sea surface temperature (SST) variations and their impact upon the vertical wind shear, moist static stability and the strength of the West African monsoon (i.e. West Sahel rainfall). There are now strong indications that we are indeed entering an era of increased major hurricane activity. Evidence for this comes from changes in the Atlantic SSTs, vertical wind shear and the character of the major hurricanes themselves. These changes may have begun to be manifested in the late 1980s, but were masked by the long running El Niño of 1991-94. However, by 1995 and 1996, clear signals that the major hurricanes had returned emerged and, with the factors, 11 major hurricanes were observed - the largest number for two years in the reliable database. Thus we conclude that the next couple decades will likely be accompanied by an active Atlantic hurricane regime with perhaps profound impacts for the peoples of the Caribbean, Central America and the United States.

### 1. INTRODUCTION

During most of the years 1970-87, the North Atlantic hurricane basin had experienced a relative lull in overall tropical cyclone activity. The below-normal activity was especially evident in drastically reduced numbers of hurricanes affecting the Caribbean Sea and basin-wide numbers of major hurricanes (MHs), and almost a total absence of MH landfalls affecting the east coast of the United States. ("Major Hurricanes" correspond to categories 3, 4 or 5 on the Saffir-Simpson scale with maximum sustained surface wind speed of at least 50 m/s.) After the experience of renewed "normal" activity in 1988 and 1989 (with five MH during those two years), it was suggested that the Atlantic basin was returning to a long-term period of higher activity such as what was experienced back in the decades of the 1950s and 1960s and some earlier periods. The heightened activity in 1988 and 1989 was followed, however, by a marked downturn in activity from 1991-94. As a result of the resumption of the below-normal activity, primarily attributed to wind anomalies driven by the highly anomalous, long-lasting warm sea-surface temperature (SST) event (El Niño) in the tropical Pacific, the notion that the Atlantic basin had entered a high-activity regime was pretty much discarded.

The warm event in the Pacific finally ended in early 1995 and was followed by one of

the most active hurricane seasons in the Atlantic on record with almost every measure of activity over twice the long-term mean. Of particular note was that the season produced five MHs for the first time since 1964. The chief issue being addressed in the current study is whether or not the activity of the 1995 season was simply an anomalous “spike” or a harbinger of multi-decadal-scale climate shifts signaling the probability of greater activity over the next ~10-20 years. Long-term climate changes are typically associated with slowly evolving fluctuations in the world’s oceans. Some of these oceanic fluctuations will be examined and related to Atlantic tropical cyclone activity.

Most of the tropical cyclones in the Atlantic basin form from easterly (African) wave disturbances which move off of the African coast primarily between  $10^{\circ}$  and  $15^{\circ}\text{N}$ . Although the number of easterly waves in the tropical Atlantic tends to be fairly steady from year to year, the fraction of these that develop into tropical cyclones exhibits substantial variability. The easterly waves account for ~60% of the Atlantic basin tropical storms and minor hurricanes but ~85% of the MHs. The vast majority of the easterly-wave spawned MHs began development (i.e., reached tropical depression strength) in the southern band between  $\sim 10^{\circ}$  and  $20^{\circ}\text{N}$ , stretching between the west coast of Africa and Central America, called the “main development region” (MDR) by Goldenberg and Shapiro 1996 (hereafter referred to as GS96). The implication of the vast majority of MHs developing in the MDR is that they are far more sensitive to conditions in the deep tropics than tropical storms or minor hurricanes and hence are much more sensitive to interannual and interdecadal fluctuations of environmental conditions in the tropics. The main key to understanding fluctuations in tropical cyclone activity in the Atlantic, especially on the interannual and interdecadal scales, is to focus on the MDR, across a portion of which *all* easterly waves *must* travel, at least initially. Conceptually, the tropical cyclone activity (and especially MH activity) can be thought of as operating similar to a sluice gate that “opens” and “shuts” in the MDR to allow easterly waves to “pass”, i.e., to develop. (For a more complete discussion of this concept and of other issues addressed in this article, see Goldenberg, et al., 1997; hereafter referred to as G97).

The climatic factors that “operate” the sluice gate can be separated into those having “local” and “remote” effects. A factor having a local effect is one that is located in the actual region of tropical cyclone development, i.e., usually in the MDR, and has a direct thermodynamic or dynamic connection to development. A factor having a remote effect is one that is located away from the actual region of tropical cyclone development, but is either associated with (i.e., an indicator of), or causes, via teleconnections, fluctuations in conditions in the MDR.

The primary local factor is the magnitude of the vertical shear between the upper- and lower-troposphere,  $|V_z|$ . It is well accepted that strong  $V_z$  inhibits the formation and intensification of tropical cyclones, primarily by preventing the symmetric organization of deep convection. Conditions for development are usually deemed unfavorable when local  $|V_z|$  exceeds  $\sim 7.5 \text{ m s}^{-1}$ . During August-September-October (ASO), the peak three months of the Atlantic hurricane season during which virtually all of the MHs form, westerly  $V_z$  dominates most of the Atlantic basin, especially over the MDR, where the climatological  $|V_z|$  is greater than  $10 \text{ m s}^{-1}$  for most of that region (GS96). These climatologically high values for  $|V_z|$  are the main reason why the Atlantic basin is not usually favorable for development, even during ASO when the SSTs are sufficiently high and easterly waves are abundant. Increased (decreased)  $|V_z|$  is generally caused by upper-level westerly (easterly) and lower-level easterly (westerly) anomalies which add to (subtract from) the climatological upper-level westerlies and lower-level easterlies over the MDR (GS96).

One of the main remote factors are SST fluctuations in the equatorial Pacific associated with El Niño/Southern Oscillation (ENSO). Positive (negative) SST anomalies associated with an El Niño (La Niña) event have been linked to unfavorable (favorable) conditions for development in the Atlantic basin due to an increase (decrease) in  $|V_z|$  over the MDR (GS96). Another remote factor that has been linked to interannual variability in Atlantic basin tropical cyclone activity are rainfall fluctuations over the western Sahel (Landsea and Gray 1992) with positive (negative) rainfall anomalies associated with favorable (unfavorable) conditions. The Sahel rainfall factor has also been attributed primarily to its association with changes in  $|V_z|$  over the MDR (GS96).

## 2. EVIDENCE FOR A MULTI-DECADAL SCALE SHIFT

### 2.1 *Observations of Tropical Cyclone Activity*

The first and most important indicator of a possible long-term shift is in the tropical cyclone activity itself. If one thinks of the interdecadal-scale fluctuations modulating the interannual-scale changes, then it is easy to see why not only the overall activity for the active decades was higher, but also the maximum values for activity were much higher. Although one might expect to see strong interannual fluctuations in activity in both active and inactive periods, the inhibiting environmental influences during the inactive decades seem to set a “cap” on the possible levels of activity. It is the assumption here that it would be highly unlikely to see certain levels of activity in the decades when decadal-scale fluctuations of certain environmental conditions are not in the phase favorable for Atlantic tropical cyclone development.

The parameter “Net Tropical Cyclone” (NTC) activity (see G97) gives a type of measure of the overall activity in a season. Figure 1 shows the Atlantic basin values of NTC for each of the seasons from 1950 through 1996. The mean for the years 1970-94 is only 75% compared to a mean of 116% for the more active period 1944-69. It is striking to note that only five years during the period 1970-94 had even marginally above average activity (i.e., >100%) compared to 15 of the earlier period being above normal. In addition, there was an apparent cap of 140% for NTC during the inactive decades. The more active 1944-69 period, however, equaled this cap two times and exceeded it six times. In 1995, for the first time since 1969, the NTC cap was exceeded with a value of 231%. In addition, the cap has been exceeded during 1996 with a value of 200%.

If years with values of NTC 150% are designated as “hyper-active” years, then there were *five* hyper-active years during the more active 1944-69 period, while *no* years were hyper-active during the years 1970-94. The hyper-active year 1995 marked the first such year since 1969. The hyper-active years occurred, on the average, every five years or so during the previous active decades. However, 1996 has exceeded 150% NTC giving the Atlantic two hyper-active years in a row for the first time since the 1932 and 1933 seasons (154% and 225% respectively). These two successive hyper-active years give a strong reason to suspect that the Atlantic basin has made the transition to a more active regime, probably on a multi-decadal scale. Evidence for this transition is also strongly evident in MH activity (see G97).

### 2.2 *Decadal-scale fluctuations in SST*

Fluctuations in western Sahel rainfall have been shown to be associated with “local” SST fluctuations in the eastern tropical Atlantic, and “remote” SST fluctuations in the midlatitudes in the Atlantic (both North and South) and in the equatorial Pacific (associated with El Niño). The key region for interannual SST fluctuations, as shown by the empirical orthogonal function (EOF) analysis of global SSTs is the Pacific Ocean, primarily the region associated with El Niño (as shown in the second mode: SST EOF2). The key regions for decadal-scale fluctuations (SST EOF3) are the midlatitudes in the Atlantic Ocean, with opposite phases in the North and South Atlantic, i.e., the North-South Atlantic dipole. Ward (1997) has shown that the multi-decadal scale fluctuations in Sahel rainfall are related to the interhemispheric SST differences, i.e., the North-South dipole, while the interannual variability in the rainfall is more closely associated with central and western Pacific SST fluctuations. It is likely that the same teleconnection patterns that are producing the fluctuations in Sahel rainfall are also contributing to changes in environmental conditions in the MDR in the Atlantic, in particular,  $V_z$ , that are affecting Atlantic basin activity.

Ward (personal communication 1996) has noticed an increase in rainfall for the Sahel region of Africa and for an “all-India” index (both calculated for July-September) during the period 1988-95 compared to the 1970-87 period. This has been observed in conjunction with a warming of the Northern Hemisphere (mid-latitude) SSTs compared to those of the Southern Hemisphere. These upturns which began in 1988 in rainfall

and Northern Hemisphere SSTs were accompanied by a decrease in the positive values of the “multi-decadal” SST EOF3 which has been positive since 1968.

Another SST indicator which points to a recent change on the decadal time scale in the Atlantic was presented in Hansen and Bezdek (1996). They examined the temporal and spatial fluctuations in the upper and lower deciles of low-pass filtered (at four years), locally normalized SST anomalies in the North Atlantic. The decadal-scale fluctuations (not shown here) basically point to warmer SSTs in the North Atlantic for the decades of the 1950s and 60s, predominately colder in the 1970s and 80s, with a reversal again (warmer anomalies dominating) manifesting itself in the late 1980s, more specifically 1987 or 1988. This shows a strong association with the observed decadal-scale fluctuations in MH activity in the Atlantic basin; greater activity in the earlier decades followed by the relatively inactive 1970s and 80s. The significance of the change at the end of the 1980s will be discussed in Sect. 3.

### 2.3 Vertical Shear Changes in the Main Development Region

Although a warmer tropical North Atlantic would seem to enhance tropical cyclone activity as a local effect (see Sect. 1), *it is unlikely that this is the main physical connection between the warmer (colder) North Atlantic and active (inactive) Atlantic hurricane seasons.* Shapiro and Goldenberg (1997) suggest that the local SST effect plays either a *negligible* role (in the case of MHs) or at best (in the case for all hurricanes) is a *second-order effect* for increased activity. The predominate effect, as discussed in Sect. 1, is more likely the fluctuations in  $|V_z|$  in the MDR. It is certainly possible that the same favorable conditions for increased Sahel rainfall, i.e., warmer North Atlantic SSTs, also, by associative arguments, result in decreased  $|V_z|$  over the MDR. In other words, the decadal-scale SST fluctuations affecting Atlantic hurricane (particularly MH) activity would likely produce the connection via changes in the upper- and lower-level zonal circulations over the MDR.

Figure 2 shows the fluctuations in ASO  $|V_z|$  (see G97 for data description) for an area in the MDR that exhibits some of the strongest correlations between  $|V_z|$  and MH fluctuations (GS96). The ASO  $|V_z|$  in the MDR experienced a noticeable shift towards lower (more favorable) values starting in 1988. The years since the shift have had *much* lower than average  $|V_z|$  values with the exception of the four years (1991-94) affected by the long-lasting anomalous tropical Pacific warm event. In addition, the lower than average values are the most favorable  $|V_z|$  values in that region since 1975, the beginning of this wind data set. The shift starting with 1988 is noticeable in both the upper- and lower-level winds (not shown) for this region. The mechanism for reduced  $|V_z|$  is the reduction of upper-level westerlies and lower-level easterlies.

## 3. DISCUSSION

The evidence presented in this study examined certain multi-decadal scale changes in Atlantic SSTs with a shift towards warmer conditions in the Northern Hemisphere beginning around 1988. This shift was accompanied by a shift towards lower vertical shear in the main development region of the Atlantic hurricane basin, a condition more favorable for increased tropical cyclone activity, especially major hurricanes. Although the lower, more favorable vertical shear conditions were modified somewhat from 1991 through 1994 during the long lasting El Niño event, the favorable values quickly resumed in 1995 as soon as the equatorial Pacific warming event had concluded. It seems indeed likely that a decadal-scale shift, associated with decadal-scale changes in Atlantic SSTs, towards a more favorable environment for Atlantic tropical cyclone development took place around 1988 but was subsequently temporarily masked by the highly anomalous, long lasting El Niño during the beginning of the 1990s.

If these changes are indeed taking place on decadal or multi-decadal scales rather than interannual scales, then the Atlantic basin may continue to see over the next decade or so, on the average, heightened activity on the order of what was seen in the 1950s and 60s rather than the suppressed activity of the 1970s and most of the 80s. What might be expected would be several years with very high activity, while most years would be close to average or slightly above average and only a few far below average. This would be dramatically different from the inactive decades when most years were below (often well below) average, some years were about average and very few years even just

moderately above average. If the past holds the key to the future in this case, the overall increase would mean significant increases in the numbers of hurricanes affecting the Caribbean Sea and regions, basin-wide numbers of MHs, and MH landfalls affecting the east coast of the U.S.

The possible implications of these changes are staggering. The fact that major hurricanes have historically accounted for most of the damage and deaths due to tropical cyclones combined with the fact that there has been a dramatic population increase along the United States hurricane-vulnerable coasts during the two inactive decades, add up to the potential for massive monetary loss, especially when major cities are impacted. In addition there is a potential for large loss of life in the case of an incomplete evacuation during a rapidly intensifying system.

Concerning the question as to whether the increase in activity experienced in 1995 is due to anthropogenic global warming, Gray et al. (1995) states that; "The large increase in 1995 Atlantic activity ... was the result of natural variations in global circulation patterns and we are able to predict a portion of this increase without invoking global warming or greenhouse gas increases. Therefore, there is *no plausible way* that increases in man-induced greenhouse gases can be even *remotely* related to this year's extremely active Atlantic basin hurricane season." There have been various studies investigating a possible impact, if any, on the number and strengths of Atlantic basin hurricanes *if* the earth experiences a long-term global warming. The results are inconclusive (Houghton, et al. 1996), with some studies documenting an increase while others suggest a decrease in associated activity. In addition, the historical multi-decadal scale variability in Atlantic hurricane activity is much greater than what could be "expected" at the present time from a small, gradual global temperature increase.

Caution must be used in applying the conclusions suggested in this study. Firstly, extrapolation, especially for decadal (and longer) time scales, certainly has a high level of uncertainty. One of the main difficulties in observing long-term fluctuations in tropical cyclone activity is that the reliable data extends back only about 50 years. If the temporal scale being addressed here is on the order of 40 years, i.e., ~20 years of higher activity and ~20 years of lower activity, then only about one complete cycle has been adequately sampled. In addition, it is unlikely that the signal is so "clean" that it would always be manifested as the same time length of favorable and unfavorable conditions, i.e., the current favorable conditions might only last a total of 5-10 years or could extend for 20-30 years, etc.

Secondly, increased activity during a particular year does not automatically mean increased storm-related damage. Even relatively inactive years can produce hurricane-spawned disasters. It is not how many systems develop in a particular year that determine the amount of damage, but how many systems actually impact land and where. Far more damage can be done by one major hurricane impacting a heavily populated area than by several major hurricanes hitting sparsely populated areas, or of course, not making landfall at all. For example, there was ~\$25 billion in damage to the United States caused by Hurricane Andrew in 1992, the only major hurricane during a relatively inactive year (NTC = 66%), compared to less than \$6 billion in damage to the United States during 1995, one of the most active years on record (NTC = 231%) with five major hurricanes. In addition, disasters can occur even from weaker systems due to flooding. It is still obvious, however, that active years have a greater overall *potential* for more regions to be impacted than inactive years.

#### 4. REFERENCES

Goldenberg, S.B., and L.J. Shapiro (1996): Physical mechanisms for the association of El Niño and West African rainfall with Atlantic major hurricane activity. *J. Climate*, 9, 1169-1187.

\_\_\_\_\_, \_\_\_\_\_, and C.W. Landsea (1997): Are we seeing a long-term upturn in Atlantic basin major hurricane activity related to decadal-scale SST fluctuations? Preprints, 7th Conf. on Climate Variations. Long Beach, CA, Amer. Meteor. Soc., 305-310.

Gray, W., C.W. Landsea, P.W. Mielke, Jr., and K.J. Berr (1995): Summary of 1995 Atlantic tropical cyclone activity and verification of authors' seasonal prediction. 27 pp. [Available from Dept. of Atmospheric Sc., Colorado State University, Ft. Collins, CO 80523.]

Hansen, D.V., and H.F. Bezdek (1996): On the nature of decadal anomalies in North Atlantic sea surface temperature. *J. Geophys. Res.*, **101**(C4), 8749-8758.

Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell, Eds. (1996): *Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, New York, 572 pp.

C.W. Landsea and W.M. Gray (1992): The strong association between western Sahel monsoon rainfall and intense Atlantic hurricanes. *J. Climate*, **5**, 435-453.

Shapiro, L.J. and S.B. Goldenberg (1997): Atlantic sea surface temperatures and hurricane formation. Submitted to *J. Climate*.

Ward, M.N. (1997): Diagnosis and short-lead time prediction of summer rainfall in tropical North Africa at interannual and multi-decadal timescales. Submitted to *J. Climate*.

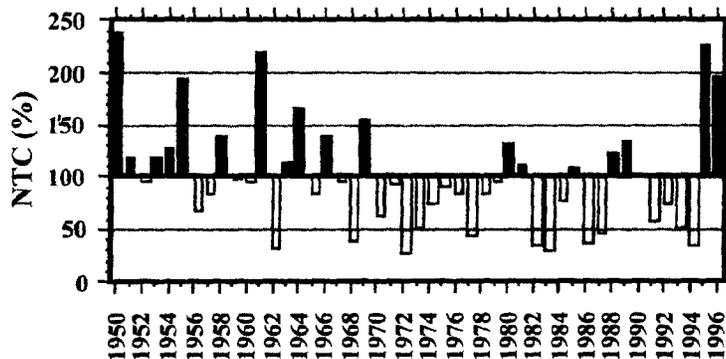


Fig 1. Net Tropical Cyclone activity (NTC) for the North Atlantic basin. Values for above (>100%) and below (<100%) average activity are shown as solid and shaded columns, respectively.

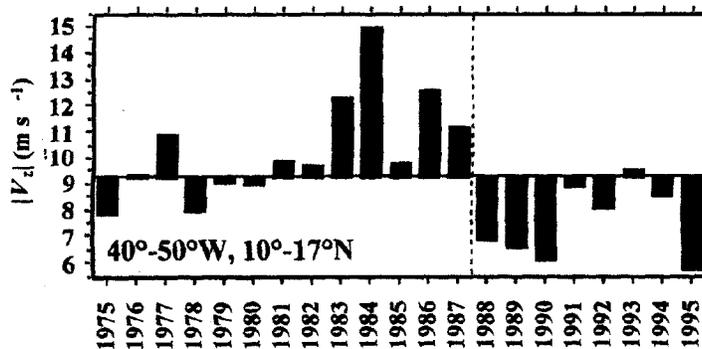


Figure 2. Average of ASO  $|V_2|$  for the region from 40° to 50°W longitude and 10° to 17°N latitude. Solid horizontal reference line corresponds to sample (1975-95) mean.

## Los ciclones tropicales de Cuba. Variaciones y tendencias observadas.

*Ramón Pérez, Maritza Ballester, Cecilia González, Miriam Limia.  
Instituto de Meteorología. Agencia de Medio Ambiente. CITMA.  
e-mail : Dinamica@met2.met.inf.cu*

**RESUMEN:** En el presente artículo se realiza un breve análisis de las variaciones y tendencias observadas en la afectación de los ciclones tropicales a Cuba. Se señala la ocurrencia de una alta variabilidad interanual y multidecadal. Fue detectada una tendencia estadísticamente significativa hacia la disminución de la actividad ciclónica en Cuba durante el presente siglo.

**ABSTRACT:** An analysis of Cuban tropical cyclone variability and trends is presented. An intense interannual variability was observed. A significant and negative trend in the Cuban tropical cyclone activity was found during this century.

### Introducción.

El archipiélago cubano se encuentra ubicado en una de las seis regiones ciclogénicas del planeta, en la cual se forma aproximadamente el 11 % de los ciclones tropicales (CT).

Entre los eventos severos del tiempo que afectan al territorio de Cuba, los CT ocupan un lugar importante. Las causas que resaltan esa importancia de los CT son múltiples y no están asociadas únicamente al impacto directo que estos ocasionan; también, su frecuencia de ocurrencia y los vínculos que tienen con algunas variables meteorológicas, los hacen parte indiscutible del clima en Cuba. Por ello, dentro de las investigaciones dedicadas al estudio de este fenómeno, aquellas destinadas al examen de su variabilidad espacial y temporal, así como de los factores que la regulan, han adquirido relevancia.

Los resultados de numerosos estudios encaminados al examen de las variaciones interanuales de la actividad ciclónica en el Océano Atlántico ( Namias y Dunn, 1955; Shapiro 1982 a y b; Gray, 1984 a y b; Shapiro, 1987; Landsea y Gray, 1992; y Ballester et al, 1997) permiten indicar que la misma es el resultado de complejas interacciones entre un amplio conjunto de factores.

Dentro de ese conjunto de factores están: el movimiento del anticiclón subtropical y la zona intertropical de convergencia; las bajas presiones en superficie y las altas temperaturas superficiales del mar en el Atlántico, asociadas a un mayor número de CT; la ocurrencia de fuertes eventos El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), que inhiben la formación de ciclones tropicales en el océano Atlántico; y la existencia de la fase Oeste en la oscilación cuasi bienal del viento ecuatorial estratosférico (QBO), que se relaciona con temporadas más activas. Ballester et al. (1995) mostraron que el nivel de actividad de las temporadas en el Golfo de México y el Mar Caribe se relaciona con la posición media de la onda en los Oestes de la troposfera baja y con la extensión de la cuña anticiclónica subtropical en el mes de abril, mientras que la ciclogénesis en toda la región atlántica se vincula también con la ubicación media de dicha onda pero, durante el mes de mayo.

Hasta el momento varias investigaciones han evaluado la afectación de los CT a Cuba, entre los que se destacan Rodríguez (1976); Limia (1976); Portela (1985); Rodríguez y Ballester (1985); Pérez Suárez et al. (1991); García y Beauballet (1992) y Limia y Paz (1994). Sin embargo los estudios sobre su variabilidad sólo recién comienzan.

En este artículo se analizan las variaciones observadas en la afectación de los ciclones tropicales a Cuba en el presente siglo. Para esto se utilizaron las trayectorias elaboradas por Ortíz (1994) y por Neuman et al. (1987), así como la cronología de Rodríguez (1976) y otros apuntes de Ortíz

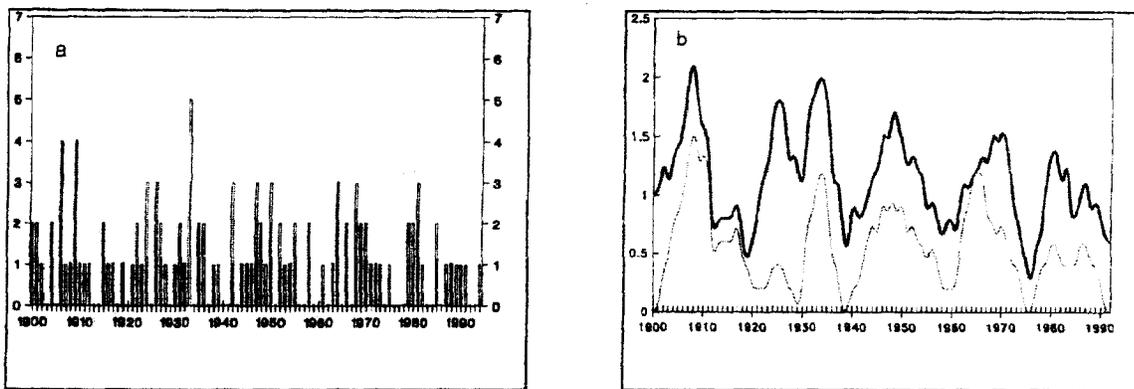
(comunicaciones personales). El análisis se realizó considerando los organismos cuyo centro cruzó sobre el territorio cubano y aquellos, que al pasar cerca, tuvieron un impacto notable sobre las condiciones del tiempo sobre nuestro país.

### Análisis de los resultados.

Cuba es un país afectado frecuentemente por ciclones tropicales; como promedio uno de ellos cruza sobre o muy cerca de su territorio cada año, en tanto los que poseen fuerza de huracán lo hacen cada dos años.

El número anual de ciclones tropicales que afectan a Cuba es muy variable, con totales que van desde 0 hasta 5 tormentas (desde 0 hasta 4 para el caso de los huracanes). Durante el período estudiado se registraron 31 años en que el país no fue afectado por ciclones tropicales, 35 años en que lo fue por uno sólo, 18 años en que fue afectado por dos, 8 años por tres, 2 años por 4 y 1933 en que fue afectado por 5. La serie estructurada (Figura 1), refleja la existencia de variaciones de baja frecuencia asociada a escalas temporales interdecadales y multidecadales. En efecto, para los CT los primeros años del siglo y los de la década del 30 fueron períodos de elevada actividad, mientras que para los huracanes se aprecia una alta actividad en los primeros años y en la década de los 60. Para estos últimos los años 20 y el intervalo de 1973 a 1995, sobresalen como los dos períodos principales de mínima actividad.

Resulta de interés que entre 1910 y 1944 (35 años) ocurrieron 9 de los 10 huracanes de gran intensidad. Este aparente **brote** de las tormentas más intensas guarda similitud con lo sucedido en el período 1844-1888 (45 años) durante el cual se formaron 5 de los 6 huracanes más intensos del pasado siglo. Aunque este comportamiento se añade a las evidencias observacionales sobre la posible existencia de ciclos en las variaciones temporales de la ciclogénesis, aún no se ha comprobado la existencia de los mismos con significación estadística dentro de la serie analizada.



**Figura 1:** a) frecuencia anual de los ciclones tropicales (barra vacía) y huracanes (barra llena) que afectaron a Cuba en el período 1900-1994; b) medias móviles de 5 años para los ciclones tropicales (línea gruesa) y huracanes (línea fina) que han afectado a Cuba.

Al aplicarse las dójimas de Mann y Wold -Wolfowitz para analizar la existencia de tendencias en las series de ciclones tropicales y huracanes que anualmente afectaron a Cuba durante el presente siglo, se halló que ambas presentan tendencias significativas a la disminución, con valores del estadígrafo de Kendall de  $-4.9$  y del coeficiente de autocorrelación de  $-0.23$  para los primeros y de  $-6.9$  y  $-0.13$  para los segundos, respectivamente. Esta tendencia fue observada y

señalada por Limia (1976) para los CT. En el caso de los huracanes, esta disminución se acentúa notablemente después de 1973. En este periodo solamente cuatro huracanes afectaron el país para un promedio de un huracán cada seis años aproximadamente. lo cual no excluye la ocurrencia de efectos desastrosos ocasionados por los ciclones tropicales Frederic (1979), Alberto (1982) y Kate (1985).

Al dividir la muestra en dos estratos, uno correspondiente al período 1900-1952 y otro al de 1953-1994 (Tabla 1), es posible apreciar un incremento de los periodos de retorno hacia la segunda mitad del siglo. Este comportamiento se hace más marcado en la región central, particularmente notable en el mes de noviembre.

**Tabla 1.** Periodos de retorno (años) de la afectación de los ciclones tropicales (según su clasificación) a Cuba en los períodos 1900-1952 y 1953-1994.

Región	Periodo	Ciclón Trop.	Torm. Trop.	Huracán
Central	1900-52	2,5	4,4	5,9
	1953-94	3,8	8,4	7,0

La tendencia antes descrita en la afectación de los CT a Cuba está condicionada por la disminución de la actividad ciclónica que ha sido observada en el Mar Caribe (Ballester et al. 1995) y por el hecho de que las tormentas originadas en el océano Atlántico han presentado cierta tendencia a realizar sus recurvas en longitudes más orientales, según lo observado por Ortíz (1988), lo que los ha alejado de las costas cubanas.

A pesar de lo señalado con anterioridad existen algunas excepciones de interés, no mostradas en la tabla. Por ejemplo, los ciclones tropicales se han incrementado en mayo, pues los que han afectado a Cuba en dicho mes lo han hecho sólo durante la segunda mitad del siglo; en la región occidental existe un incremento al inicio y al final de la temporada; para la región oriental se ha observado un aumento en el mes de septiembre. Otra excepción de interés es que en agosto se produce un incremento de la afectación de huracanes en todo el país, el que se mantiene en septiembre en las regiones central y oriental y en octubre en la región oriental. Esta última región es la única en la que se observa un incremento del número de huracanes durante el segundo periodo.

## Conclusiones.

La afectación de los ciclones tropicales a Cuba posee una alta variabilidad interanual. También se alternan períodos de mayor y menor actividad. Un período de relativa tranquilidad se ha producido desde 1973, aunque ocurrieron ciclones tropicales con efectos desastrosos, relacionado con las disminuciones ocurridas en el Mar Caribe y en parte con las recurvas más orientales de los originados en el Atlántico lejano.

No existe aún un estudio detallado acerca de la variabilidad de los ciclones tropicales de Cuba y los factores que la regulan. Es de suponer que la ocurrencia del eventos ENOS disminuya la frecuencia de afectación a Cuba ; pero esto no ha sido cuantificado ni argumentado. Otros factores como la oscilación cuasi bienal, pueden manifestar una relación más compleja.

En el Instituto de Meteorología se ejecuta en la actualidad un proyecto en el que se pretende realizar un estudio detallado acerca de qué factores regulan la variabilidad interanual, cuáles condicionan las oscilaciones de largo período y cuáles pudieran motivar la aparición de tendencias a largo plazo.

**Agradecimientos.** Este trabajo contó con la valiosa colaboración de las compañeras Milagros Sarmiento, Mayra Pérez, Juana Durand y Antonia Ortega en la búsqueda de información y procesamiento de datos. Sin ellas este trabajo no hubiera sido posible.

## Referencias.

**Ballester, M., y C. González (1997):** Variaciones y tendencias de la ciclogénesis tropical en el Atlántico Norte. Bol. de la Sociedad Meteorológica de Cuba. Vol. 3. Nro. 1.

**García A. y P. Beauballet (1992):** Sistema de información estadística sobre ciclones tropicales, Trabajos del 1er. Congreso Iberoamericano de Meteorología Tropical, Tomo I, 299-302.

**Gray, W. (1984a):** Atlantic seasonal hurricane frequency. Part I: EL Niño and 30 mb quasi-biennial oscillation influence. Mon. Wea. Rev., 112, 1649-1668.

----- (1984b): Atlantic seasonal hurricane frequency. Part II: Forecasting its variability. Mon. Wea. Rev., 112, 1669-1683.

**Landsea, C. W., and W.M. Gray, (1992):** The strong association between Sahelian monsoon rainfall and intense Atlantic hurricanes. J. Climate, 5, 435-453.

**Limia, M. (1976) :** Climatología y estadística de los ciclones tropicales en Cuba. UDICT, INSMET, CITMA. 15 pp.

**Limia M. y L. Paz. (1994):** Los Ciclones Tropicales. En *El Clima de Cuba* ( Ed. Academia, La Habana): 121 - 128.

**Namias G., y G. Dunn. (1955):** The weather and general circulation of august 1955. Mon Wea. Rev., 83, p. 163-170.

**Neumann, J.C., R.B. Jarvinen, and C.A. Pike (1987):** Tropical Cyclones of the North Atlantic Ocean, 1871 - 1986. Prepared by National Climatic Data Center, Ashville, NC, in cooperation with the NHC, Coral Gables, Fl, US. Department of Commerce, NOAA. 186 pp.

**Ortiz, R.** (1988): Una observación sobre las trayectorias de los huracanes y perturbaciones ciclónicas. Rev. Cub. de Met., Vol.1, No1., 66 - 68.

----- (1994): Trayectorias de los ciclones tropicales del Atlántico. (Inédito). Instituto de Meteorología. 76 pp.

**Pérez Suárez R., M. Ballester, C. González e I. Salas** (1991): Cambios Climáticos y Ciclones Tropicales. I Taller sobre Cambios Climáticos y sus consecuencias. (Inédito). Instituto de Meteorología. La Habana. 10 pp.

**Portela, M.** (1985): Algunas cuestiones de la climatología de los ciclones tropicales en Cuba. Resúmenes del II Simposium Internacional. Lab. Conj. Cuba - URSS de Meteorología Tropical (traducción al español). La Habana. (Ed. Hidromet., Leningrado): 112 - 119.

**Rodríguez, M.** (1976): Cronología clasificada de los huracanes que han azotado a Cuba hasta 1975. UDICT, Instituto de Meteorología, La Habana. 7 pp.

----- y M. Ballester (1985): Clima. En *Nuevo Atlas Nacional de Cuba* (Instituto de Geografía, ACC, La Habana - Madrid ) VI.2.1 - VI.2.2.

**Shapiro, L.,** (1982a): Hurricane climatic fluctuations. Part I: Patterns and Cycles. Mon. Wea. Rev., 110, 1007--1013.

----- (1982b): Hurricane climatic fluctuations. Part II: Relation to large-scale circulation. Mon. Wea. Rev., 110, 1014-1023.

----- (1987): Month- to- month variability of the Atlantic tropical circulation and its relationship to tropical storm formation. Mon. Wea. Rev., 115, 2598-2614.

## Resultados de los pronósticos estacionales para las temporadas ciclónicas de 1996 y 1997.

*Maritza Ballester Pérez, Cecilia González Pedroso, Ramón Pérez Suárez*  
*Instituto de Meteorología*  
*e-mail: Dinamica @ met2.met.inf.cu*

**Resumen :** En este trabajo se presentan las evaluaciones de los pronósticos estacionales de la actividad ciclónica emitidos en 1996 y 1997, a partir del método diseñado en Cuba. Se hace un análisis del comportamiento de dicho método, así como de las características de la circulación general de la atmósfera que prevalecieron en cada una de las temporadas consideradas.

**Abstract :** In this paper the evaluations of the cyclonic activity seasonal predictions for the years 1996 and 1997, by means of the scheme which was designed in Cuba, are presented. The behaviour of this scheme and the characteristics of the atmospheric general circulation, which predominated in these seasons, are analyzed too.

### Introducción

Los primeros trabajos concernientes a los pronósticos estacionales de la actividad ciclónica fueron hechos por Nicholls (1979, 1985) para las dos regiones ciclogénicas Australianas. Para el Atlántico Norte los principales estudios sobre la predictabilidad en la región se han venido desarrollando desde la década del 80 por los investigadores norteamericanos W. Gray y L. Shapiro ( Gray 1984a, 1984b, 1993, Gray et al. 1992; Shapiro 1987, 1989; Shapiro y Goldenberg, 1994).

En Cuba Soroshinsky (1985) abordó por primera vez este tipo de estudio y obtuvo relaciones de pronóstico con los elementos de la circulación de gran escala en el abril precedente. Al incursionar en el campo de la predictabilidad estacional de la actividad ciclónica, como una continuación del trabajo iniciado por ese autor, se decidió aunar la experiencia de diferentes especialistas del ámbito internacional y acometer el desarrollo de un método de carácter estadístico (Ballester et al., 1995), que determina además otras características de las temporadas ciclónicas, complementarias para el interés del área del Caribe, área conocida como de peligrosidad potencial para Cuba.

En ese método se trabajó con una muestra dependiente, que abarcaba el período 1967-1991 y el mismo se aplicó de forma operativa en 1995, previéndose en esa temporada un incremento significativo de la actividad ciclónica, con respecto al período 1991-94 de relativa tranquilidad, aunque no tan alto como los niveles alcanzados por la misma. Después la muestra de trabajo se extendió desde 1966 hasta 1994 (29 temporadas) y sobre la base de los resultados anteriores se obtuvo otra variante (Ballester y González, 1996a), también con la aplicación del análisis de regresión lineal. Las correlaciones de rango, que describen la habilidad de esta última mediante una validación cruzada, oscilan entre 0.83 - 0.44, significativas a los niveles del 1 - 5 %. Los pronósticos están disponibles el 2 de mayo, con una actualización el 1<sup>er</sup> de agosto.

El presente estudio se dedica a analizar el comportamiento de este último método de pronóstico estacional en las temporadas ciclónicas de 1996 y 1997, lo que unido a la experiencia adquirida en 1995 permite determinar sus deficiencias, las que deben ser consideradas en futuras aplicaciones.

### **Predictandos y predictores.**

La actividad ciclónica está dada fundamentalmente por el número de organismos tropicales con lluvias y vientos fuertes asociados. Un conocimiento a priori de la frecuencia de los ciclones tropicales durante una temporada ciclónica en una región determinada es de interés, ya que permite estar alerta sobre todo en aquellos años en que se predice un número por encima de lo normal. De ahí, que ésta sea la característica más considerada como predictando en los estudios relacionados con la predictabilidad de dicha actividad. También resulta interesante conocer con antelación la fecha aproximada en que debe surgir el primer ciclón y disiparse el último, si se tiene en cuenta que para Cuba el comienzo temprano y los meses finales de la temporada son periodos de alto riesgo.

Atendiendo a lo antes planteado se tomaron como variables a pronosticar: el número de ciclones tropicales (CT), el número de huracanes (H), el número de ciclones tropicales a originarse en el área oceánica (At) y los días en que se categoriza el primer organismo nombrado (Com) y en que se disipa el último (Fin), expresadas estas dos últimas en días Julianos.

La mayoría de los ciclones tropicales que afectan a Cuba se originan en el área caribeña o provienen del océano con una componente pronunciada al oeste en sus rumbos, de ahí que, un conocimiento a priori de la cantidad de organismos de estas procedencias sea de mayor interés. Para tener una información complementaria sobre la posible peligrosidad de afectación de la actividad ciclónica a Cuba durante una temporada, se extrajeron además las series correspondientes al número anual de ciclones originados en el Caribe y Golfo de México (CG) y al número de ciclones que penetraron en el Caribe procedentes del Atlántico (AtC).

Se debe señalar que todas las variables presentan variaciones considerables (Ballester et al, 1995) , por lo que sus predicciones son de interés.

En la primera etapa de la investigación, la selección de los predictores potenciales se hizo según la disponibilidad de la información para conformar la muestra de trabajo y su posterior evaluación en la práctica, además de considerar los resultados obtenidos por los autores citados con anterioridad. Ellos en sus investigaciones se fundamentaron en las relaciones de la ciclogénesis con los patrones de presión de gran escala, la influencia del evento El Niño - Oscilación del Sur (ENOS) y la Oscilación Quasi-Bienal del Viento en la estratósfera ecuatorial (OQB). Teniendo en cuenta esas relaciones y las posibilidades reales de conocer a priori el comportamiento de las variables, que caracterizan en cierta medida los aspectos tratados, se obtuvieron mediante métodos regresivos de selección los siguientes predictores para los distintos predictandos:

- a) Presión central (p) media del anticiclón subtropical del Atlántico en superficie (-1000 hPa), para CT, H y At.
- b) Longitud media del centro anticiclónico en el nivel de 850 hPa (lo8), para Com.
- c) Latitud media del centro anticiclónico en el nivel de 500 hPa (la5), para Com.
- d) La diferencia entre la latitud media del centro anticiclónico en superficie y p (lap), CT, At y Fin.
- e) Promedio de la presión superficial media diaria (Pcar) de cinco estaciones meteorológicas de la cuenca caribeña ( 72201, 76644, 78526, 78988 y 78954 ), para Com.

Los promedios se refieren al mes de abril a las 0000 UTC. Se tomó este mes, correspondiente

a la primavera, porque las posibilidades de originarse un ciclón tropical en él son casi nulas y porque permite además, disponer de un pronóstico a principios de mayo, que da la posibilidad de predecir un comienzo de temporada extemporáneo.

f) Índice que caracteriza el evento ENOS ( $N_i$ ), cuyo signo se corresponde con el del Índice de Oscilación del Sur: 1 = no presencia, -1 = moderado, -2 = fuerte para CT, H, At y Fin.

g) Índice para caracterizar la Oscilación Quasi-Bienal estratosférica (oqb), utilizado así por Gray (1984b): 1 = fase oeste, 0 = transición, -1 = fase este para Ct, H y At.

### Resultados de la evaluación.

#### a) Temporada ciclónica de 1996.

La temporada ciclónica de 1996 superó con amplitud las expectativas en cuanto al número de ciclones tropicales a surgir en el área que abarcan el mar Caribe y el golfo de México, además de la cantidad de huracanes a formarse en toda la región atlántica.

En la Tabla 1 se muestra el comportamiento del pronóstico estacional emitido en mayo (Ballester y González, 1996b), por medio de la comparación entre los valores pronosticados (P) y reales (R) de los predictandos, así como entre las desviaciones normalizadas de estos valores (DP y DR, respectivamente), tomando en cuenta los valores medios para el período 1966 - 94. Como norma se consideran los valores de las desviaciones oscilando entre -0.5 y 0.5.

Tabla 1. Comportamiento del pronóstico estacional de la actividad ciclónica en 1996.

Variable	P	R	DP	DR
CT	10	13	0.4	1.5
H	5	9	0.1	2.0
At	7	7	0.3	0.3
AtC	2	2	0.5	0.5
CG	3	6	0.3	2.6
Com	193	170	0.1	-0.7
Fin	319	330	0.5	0.9

En esa Tabla se puede apreciar que los signos de las desviaciones coinciden, excepto el del predictando referido al comienzo de la temporada, en que se pronosticaba la formación de la primera tormenta tropical dentro de un período normal y este resultó más temprano. En este aspecto determinó la categorización de la débil tormenta Arthur, cuyos vientos no sobrepasaron el límite inferior (64 Km/h) de esa clasificación, durante casi un día.

Las tormentas Arthur y Kyle, esta última con un tiempo de existencia de apenas un día, elevaron a 13 el número de ciclones tropicales, sobrepasando esta variable la norma esperada.

Las variables pronosticadas que se alejaron significativamente de lo real fueron CG y H. Sin embargo, pronósticos certeros se hicieron para el número de ciclones tropicales que se formaron sobre el área oceánica y de la cantidad de ellos, que llegaron hasta el Caribe. La disipación prevista del último organismo en noviembre también fué acertada.

En agosto se realizó una actualización de la predicción estacional (Ballester et al., 1996) donde se reafirmaban los criterios expresados en abril sobre el comportamiento de la temporada cercano a lo normal y que los meses más probables de afectación a Cuba eran septiembre, octubre y noviembre. En dicha actualización se adicionó el pronóstico de que al menos un organismo oriundo del área caribeña afectaría al archipiélago cubano, con una probabilidad relativamente alta (63%). Lo previsto para Cuba se cumplió al ser impactada

por el huracán Lili en octubre y amenazada por Marco en noviembre.

La actividad ciclónica de esta temporada fué favorecida fundamentalmente por el ambiente anticiclónico, que predominó durante ese tiempo en la alta troposfera de la cuenca del Caribe y el Atlántico tropical, lo cual estuvo relacionado con las condiciones de enfriamiento existentes en el Pacífico ecuatorial. Otro factor contribuyente a la ciclogénesis en la región fue el ligero calentamiento presentado en las aguas del Atlántico (anomalías entre 0.2° - 0.4°C). Los patrones de la circulación atmosférica en superficie y los niveles medios de la troposfera en el Atlántico tuvieron un comportamiento cercano a lo normal; siendo por tanto, la fase Este predominante de la Oscilación Cuasi-Bienal del viento en la estratosfera ecuatorial, el único factor adverso a la formación de los ciclones tropicales en el área.

#### b) Temporada ciclónica de 1997

La actividad ciclónica en 1997 no alcanzó las expectativas, ya que la misma se presentó poco activa, tanto en el número de ciclones tropicales como en la intensidad que ellos alcanzaron. En la Tabla 2 se muestra el comportamiento de cada uno de los pronósticos emitidos (Ballester et al. 1997a, 1997b), con los mismos criterios considerados en la Tabla 1.

Tabla 2. Comportamiento de los pronósticos de la actividad ciclónica en 1997.

Variable	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	R	DP <sub>1</sub>	DP <sub>2</sub>	DP <sub>3</sub>	DR
CT	12	7	10	7	1.1	-0.6	0.4	-0.6
H	7	5	6	3	1.0	-0.1	0.5	-1.1
At	8	6	7	6	0.7	-0.1	0.3	-0.1
AtC	2	1	2	0	0.9	0.0	0.9	-0.9
CG	4	1	3	1	1.0	-1.1	0.3	-1.1
Com	153	-	-	182	-1.2	-	-	-0.3
Fin	311	281	296	290	0.3	-1.0	-0.4	-0.6

Los resultados de P<sub>1</sub> emitidos en mayo, se obtuvieron bajo el supuesto de que el evento ENOS no sería lo suficientemente maduro antes del mes de noviembre, como para inhibir la actividad ciclónica en el océano Atlántico, además de que existirían condiciones favorables para la ciclogénesis dada por el predominio de los vientos del oeste en la estratosfera ecuatorial a alturas de 21-24 Kms durante la temporada. La circulación atmosférica desde la superficie hasta los 6 Kms de altura en el Atlántico Norte en abril también indicaba una temporada de comportamiento activo, según la clasificación por patrones de presión de González y Ballester (1996).

El evento ENOS evolucionó con rapidez y ya en julio era evidente su influencia negativa, con la imposición de corrientes del oeste en la alta troposfera del Atlántico tropical. Por esta razón se hizo una revalorización de las ecuaciones bajo condiciones de ENOS fuerte (índice Ni=-2), cuyos resultados (P<sub>2</sub>) se reflejan en la Tabla 2. No obstante, julio se presentó muy activo con una depresión tropical y cuatro tormentas, dos de las cuales alcanzaron la categoría de huracán. El desarrollo durante este mes de cuatro tormentas tropicales sólo había ocurrido en 1966 y 1995 (años sin manifestaciones de ENOS), en una serie que data desde 1870. Todas las tormentas en sus génesis tuvieron una influencia baroclínica y estuvieron asociadas a la presencia de la vaguada tropical de la alta troposfera, originándose en latitudes relativamente altas, siendo esto último normal en las dos primeras decenas del mes en que ellas se desarrollaron.

La situación de julio se explicó a través de la hipótesis de que la actividad ciclónica hasta ese momento, estaba condicionada por factores capaces de compensar la acción desfavorable del ENOS, tales como las condiciones mencionadas de la circulación atmosférica en la

estratosfera baja y desde la superficie hasta la troposfera media. Además la temperatura superficial del mar en el Atlántico Norte mostraba valores superiores ( $0.4^{\circ}\text{C}$ ) a la norma, lo cual se relaciona con temporadas ciclónicas más activas.

También se analizaron aquellos años de la muestra dependiente en los que se presentó un evento ENOS fuerte en desarrollo (1972, 1982, 1986, 1987 y 1991), calculándose los valores medios de la actividad ciclónica en el período de agosto a noviembre, con los resultados siguientes:  $CT=5$ ,  $H=3$ ,  $At=4$  y  $CG=1$ . En ninguno de esos años estaban presentes las condiciones compensantes ya citadas. Estos criterios se consideraron en la actualización del pronóstico divulgado en agosto, donde se previó una actividad más próxima a un año con influencia de un ENOS para el resto de la temporada. Lo expresado en dicha actualización reflejaba el ajuste realizado a los resultados  $P_2$ , lo cual se presenta en la columna  $P_3$  de la Tabla 2.

En lo que respecta a Cuba, la ocurrencia de eventos ENOS moderados o fuertes disminuye la frecuencia de afectación de los ciclones tropicales, principalmente de aquellos que lo hacen con intensidad de huracán, pero la misma no se elimina de forma absoluta, manteniéndose un valor aproximado al 50%. En este caso, de los cinco años considerados, Cuba fue afectada en cuatro años (excepto en 1986) por cuatro organismos, dos en junio y dos en octubre. Si bien los sistemas surgidos en junio quedan fuera del período de la temporada reanalizado, la ciclogénesis tropical en estos dos meses responden a las mismas condiciones meteorológicas de los momentos de tránsito de una estación a otra. En consecuencia, el conjunto de factores tomados en cuenta indicaron que la probabilidad de afectación a Cuba disminuía con respecto a la pronosticada en mayo, del 84% para los originados en el área caribeña y 60% para los formados en el resto de la región al 62% y 35% respectivamente, manteniéndose el potencial de afectación relativamente alto para las formaciones en el Caribe.

Al analizar el resultado del pronóstico  $P_1$  se observa una sobrevaloración de la actividad ciclónica, quedando en todos sus aspectos por encima de la norma, al no preverse el desarrollo vertiginoso alcanzado por el evento ENOS. La evaluación de las ecuaciones al incorporarle el factor característico para condiciones de eventos fuertes ( $P_2$ ) redujo drásticamente la actividad pronosticada con anterioridad y sus resultados coinciden con la realidad en lo referente a la cantidad de ciclones tropicales y su distribución por áreas, mientras que las variables  $H$  y  $AtC$  quedaron por encima. Sin embargo, el ajuste realizado ( $P_3$ ) incrementó todos los valores pronosticados, aunque redujo el pronóstico inicial de temporada activa a normal, excepto para la variable  $AtC$  que se mantuvo igual.

La sobrevaloración subjetiva del ajuste estuvo dado por las condiciones atmosféricas y térmicas del océano Atlántico Norte, que favorecían a la ciclogénesis y por el hecho de que la actividad de julio había sido un récord, no concordante con el desarrollo del ENOS, por lo que se prefirió no alejarse mucho de los valores medios de la actividad ciclónica para el resto de la temporada, según los años más análogos referidos al evento ENOS.

Con relación al comienzo de la temporada ciclónica se previó que éste fuera a principios de junio. Esta anomalía coincidió en cuanto al signo, pero no tan temprano como lo esperado. Dicho pronóstico conllevó a considerar a junio como mes de posible riesgo para Cuba, atendiendo al comportamiento climatológico. Un pronóstico más acertado se tuvo en el reanálisis para el final de la temporada, ya que en este caso el factor primordial, que interviene en la ecuación es la presencia del ENOS, el cual al tomarse en cuenta disminuyó lo pronosticado al inicio para los primeros días de noviembre hacia alrededor del 20 de octubre, después de una corrección. Se debe señalar, que atendiendo a esos resultados en ningún

momento se consideró a noviembre como mes de riesgo para el territorio cubano.

La previsión probabilística para Cuba en mayo se redujo después significativamente en lo referente a la influencia por sistemas provenientes de la región oceánica, pero la reducción para las formaciones caribeñas no resultó lo suficientemente alta, ya que fué el resultado de que se esperaba una formación en el Caribe para el resto de la temporada y de que en los años con eventos ENOS utilizados mayoritariamente, Cuba había sido azotada al menos por un ciclón tropical. Cabe destacar que, la probabilidad del 62% de afectación dada en la actualización se refería a una tormenta tropical y no a huracán.

### Conclusiones.

- a) La fuente principal de degradación de los pronósticos en la fase operativa es la inhabilidad para determinar si un evento ENOS está en evolución y cuán intenso será, lo cual puede enmendarse con una actualización en agosto, si las condiciones del evento son discernibles.
- b) Otra posible fuente de degradación son las variaciones multidecadales que ocurren en la circulación general de la atmósfera, las cuales pueden conllevar a periodicidades de frecuencias (más bajas o más altas) de la actividad ciclónica, no representativas de la muestra de trabajo considerada.
- c) En casos de ajustes se deben considerar las características climatológicas.

### Referencias.

Ballester, M. y C. González (1996a): Un método para el pronóstico estacional de la actividad ciclónica en el Atlántico Norte. Boletín de la Sociedad Meteorológica de Cuba, Vol. 2, No.1.

----- y ----- (1996b) : Pronóstico para 1996 de la actividad ciclónica en el Atlántico Norte. Boletín de la Sociedad Meteorológica. Vol. 2, No.1.

-----, ----- y R. Pérez (1995): Variabilidad de la ciclogénesis tropical en el Atlántico Norte. Informe Final del Resultado 415.511, Instituto de Meteorología, 88 pp.

-----, ----- y M. Limia (1996): Pronóstico para 1996 de la actividad ciclónica en el Atlántico Norte (Actualización). Boletín de la Vigilancia del Clima. Vol. 7, No. 7. 11 pp.

-----, ----- y R. Pérez (1997a): Pronóstico para 1997 de la actividad ciclónica en el Atlántico Norte. (Actualización). INSMET. 1p.

-----, -----, ----- y M. Limia (1997b): Pronóstico para 1997 de la actividad ciclónica en el Atlántico Norte. Boletín de la Sociedad Meteorológica de Cuba. Vol. 3, No. 2.

González, C. y M. Ballester (1996): Circulación atmosférica en el Atlántico Norte y su relación con la actividad ciclónica. Boletín de la Sociedad Meteorológica de Cuba, Vol. 2, No. 1.

Gray, W.M. (1984a): Atlantic Seasonal Hurricane Frequency. Part I: El Niño and 30 mb Quasi-Biennial Oscillation Influences. Mon. Wea. Rev. **112**, 1, 1649 - 1668.

----- (1984b): Atlantic Seasonal Hurricane Frequency. Part II: Forecasting its variability. Mon. Wea. Rev., **112**, 9, 1669 - 1673.

----- (1993): Global Guide to Tropical Cyclone Forecasting WMO/TD No 560. Chapter 5: Seasonal Forecasting. 21 pp.

-----, C.W. Landsea, P. Mielke and K. Berry (1992): Predicting Atlantic Seasonal Hurricane Activity 6 - 11 months in advance. *Wea. and Forecasting Journal*, 7, 440 - 455.

Nicholls, N. (1979): A possible method for predicting seasonal tropical cyclone activity in the Australian region. *Mon. Wea. Rev.* 107, 12, 1221 - 124.

----- (1985): Predictability of interannual variations of australian seasonal tropical cyclone activity. *Mon. Wea. Rev.* 113, 7, 1144 - 114

Shapiro, L.J.(1987): Month to month variability of the Atlantic Tropical Circulation and its relationships to tropical cyclone formation. *Mon. Wea. Rev.* 115, 2598 - 2614.

----- (1989): The relationships of the Quasi-Biennial Oscillation to Atlantic tropical storm activity. *Mon. Wea. Rev.* 117, 1545 - 1552.

Shapiro, L.J. and S. Goldenberg (1994): Atlantic Climate and Hurricane Cycles. Hurricane Research Division. Fiscal year 1994 Programs - Fiscal year 1995 Plans. NOAA. 40 pp.

Soroshinsky, M.A. (1985): Jaracteristik sezona uraganov v severnoi Atlanticheskie s nektorimi parametrami krupnomashtabnoi tsirkulatsii. *Trop. Met. Trudi 2ovo Mezhdunarodnovo Simpoziuma. Guidrometeoizdat. Leningrad.* 160 - 165.

**Seasonal Forecasting of Atlantic Hurricanes:  
Prof. Bill Gray's Project's Results**

by

*Christopher W. Landsea<sup>1</sup> and William M. Gray<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>*Hurricane Research Division/AOML/NOAA, 4301 Rickenbacker Cswy., Miami, Florida, 33149*

*Email: <landsea@aoml.noaa.gov>*

<sup>2</sup>*Department of Atmospheric Science, Colorado State University, Ft. Collins, Colorado, 80523*

**RESUMEN:** La cuenca Atlántica presenta grandes variaciones de año en año tanto en el número de ciclones tropicales como en la intensidad que ellos alcanzan. Por ejemplo el año de 1996 fue extremadamente perturbado con nueve huracanes, seis de los cuales afectaron la región del Mar Caribe. En contraste, 1997 fue muy tranquilo con solo tres huracanes, ninguno de los cuales golpeó el Caribe. En trabajos previos se ha mostrado que los huracanes del Atlántico están determinados por El Niño - Oscilación del Sur, la Oscilación cuasi bienal estratosférica y algunos otros factores locales, tales como: temperatura de la superficie del mar, la intensidad del monzón y la lluvia asociada a él, las presiones superficiales y la cizalladura vertical del viento. El conocimiento de cómo estos variados factores están relacionados con la actividad ciclónica tropical en el Atlántico es un reto debido al corto tamaño de las muestras disponibles. Comenzando en 1984 se ha desarrollado las metodologías que proporcionan pronósticos estacionales para esta cuenca. Detalles de estos esquemas de pronósticos desarrollados por el profesor Bill Gray y por el autor de este artículo así como una evaluación de este tipo de pronóstico para los años de 1984-1997 se presentan.

**ABSTRACT:** The Atlantic basin displays large year-to-year variations in numbers of tropical cyclones and the intensity to which they reach. For example, 1996 was an extremely busy with nine hurricanes, six of which afflicted the Caribbean Sea region. In contrast, 1997 was very quiet with only three hurricanes, none of which struck the Caribbean. Previous work has shown that the Atlantic hurricanes are determined by the El Niño-Southern Oscillation, the stratospheric Quasi-Biennial Oscillation) and several local factors (such as sea surface temperature, monsoon intensity and rainfall, sea level pressures and tropospheric vertical shear). Understanding how these various factors relate to tropical cyclone activity in the Atlantic can be challenging due to the fairly short (on the scale of only tens of years) record of reliable data. Beginning in 1984, methodologies have been developed that provide seasonal forecasts for the Atlantic basin. Details of these forecasts schemes developed by Prof. Bill Gray and the author are provided as well as evaluations of real-time forecasts for the years 1984-1997.

### **I. Introduction.**

Tropical cyclones are the costliest and deadliest natural disasters around the world, as the approximate 300,000 death toll in the infamous Bangladesh Cyclone of 1970 and the \$26.5 billion (U.S.) in damages due to Hurricane Andrew in the Southeast United States can attest. Understanding and being able to predict how both tropical cyclone frequencies and intensities vary from year to year is obviously a topic of great interest to meteorologists, public and private decision makers and the general public alike.

### **II. Predicting seasonal variations of tropical cyclones**

Currently, the only feasible methodology for seasonal tropical cyclone forecasting is by the use of statistical regression models. Eventually, the use of numerical models (or global circulation models - GCMs) to produce seasonal forecasts may also be possible. Indeed, there have been a couple of encouraging steps forward (e.g. Wu and Lau 1992; Watterson et al. 1995) that have shown that - either directly through the number of tropical cyclone-like vortices or indirectly through measurements of crucial environmental fields - there may someday be skill with such models. However, real-time skill today is unattainable because of a) the inability in some GCMs to produce a realistic representation of tropical cyclones in the coarse grid spacing available; b) the complete lack of a stratospheric quasi-biennial oscillation (QBO) - shown earlier to be a crucial component in the tropical cyclone variability of many regions - in the GCMs; and c) the inability to forecast the oceanic boundary conditions including the timing, phase and magnitude of the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) phenomena as well as local SST anomalies. However, as detailed below, statistical forecasting schemes have already and are continuing to provide skilled and useful predictions of tropical cyclone activity around the world.

With the completion of the 1997 hurricane season, Prof. William Gray and colleagues at Colorado State University (U.S.) have issued real-time seasonal hurricane forecasts for fourteen years. The original forecasting procedures are described in Gray (1984a,b), but have since been substantially redeveloped and improved. Forecast techniques have been developed from the analysis of data going back to 1950. Instead of an ordinary least squares (OLS) regression technique, Gray et al. (1992, 1993, 1994) have utilized a linear regression model based upon the least absolute deviations (LAD). LAD creates regression lines that are fitted to the data by minimizing the actual distance between hindcasted values and the observations. This differs from the more traditional OLS regression approach that is based upon the unphysical square of the same distance. Thus all observations are weighted equally in LAD rather than an undue emphasis on the outliers that is seen in OLS. Complimentary with LAD is the use of the agreement coefficient,  $\rho$ , which provides a measure of the fit of hindcasted and observed tropical cyclone values. The agreement coefficient (Mielke 1991) measures skill by comparing the absolute differences between hindcasted and observed values versus a random assortment of these absolute differences: a  $\rho = 0$  indicates absolutely no agreement between hindcasted and observed values and a  $\rho = 1$  indicates perfect agreement between the two. Values of  $\rho$  that range from 0 to 1 can be considered the amount of variability that the hindcasts can explain in the observations.

Forecasts issued at the end of the previous year's hurricane season are a fairly recent endeavor. The 1 December forecast is based upon five predictors (Gray et al. 1992). These predictors include those based upon the extrapolated state of the stratospheric QBO through the zonal winds at 50 mb, 30 mb and the vertical shear of the zonal winds between the two levels and previously measured North African rainfall - August and September precipitation within the western Sahel and August through November precipitation along the Gulf of Guinea. Table 1 lists these predictive groupings and Fig. 1 shows the location of these various predictors.

Table 1: Various predictive groups utilized in Gray et al.'s (1992, 1993, 1994) 1 December, 1 June, and 1 August forecasts of Atlantic seasonal tropical activity. The numbers in parenthesis indicate the amount of predictors used in each group.

1 December	1 June	1 August
QBO (3)	QBO (3)	QBO (3)
African rainfall (2)	African rainfall (2)	African rainfall (2)
-----	Current ENSO (4)	Current ENSO (2)
-----	Caribbean SLP/200mb winds (2)	Caribbean SLP/200mb winds (2)
-----	African Temp./SLP gradients (2)	-----

Because of the consistency of the QBO, successful long range extrapolations of the mean stratospheric zonal winds can be made almost a year in advance. For this 1 December forecast time, an extrapolation of mean following-year September QBO conditions is made based upon November information. The two West African rainfall indices are needed for Atlantic tropical cyclone forecasting because of the intimate link between concurrent seasonal amounts of intense hurricane activity and seasonal rainfall in the Sahel of West Africa (Landsea and Gray 1992). Gray et al. (1992) identified that rainfall along the Gulf of Guinea and in the Sahel itself provides a somewhat dependable indication of future Sahel rainfall (and thus Atlantic hurricane activity). The Sahel rainfall correlation to its previous year rainfall is reflected in the strong tendency for anomalies of precipitation to continue from year to year. This persistence is likely due to a combination of global sea surface temperature forcing (Lamb 1978; Folland et al. 1986) and changes in the land surfaces including desertification which may reinforce drought conditions (Nicholson 1988; Xue and Shukla 1993). The positive feedback between the Gulf of Guinea rainfall in August through November to Sahel rainfall/Atlantic hurricanes the following year appears to result from changes in available moisture for the North African monsoon through long-term storage in the soil and biosphere (Gray et al. 1992). While the previous year Sahel rainfall can be used to forecast for only about 5% of the intense hurricane variability, the Gulf of Guinea rainfall anomalies provide a much stronger predictor of around a third of the variability hindcasted in the intense hurricane activity.

Overall, the 1 December hindcasts were able to explain about 40% to 50% of the variability of the tropical cyclone activity. Because of the tendency of overfitting of statistical regressions with large numbers of predictors relative to the number of datapoints (e.g. greater than around one to ten) in a non-cross validated approach (Elsner and Schmertmann 1994), true independent forecasts will have a substantial degradation in skill. Thus the skill estimated to be available for future independent predictions is at the level of 20-35% of the variability according to methodology described in Mielke et al. (1996). This can be compared to climatology, which provides none of the variance by definition, and to year-to-year persistence (i.e. an auto-regressive model with a one year lag), which only can

account for about 5% of the variability. Fig. 2 demonstrates the observed differences in intense hurricanes for the ten hindcasts for the most active tropical cyclone seasons and the ten hindcasts for the quietest seasons. Note the very large differences in observed intense hurricane tracks indicating a substantial amount of skill present in these hindcasts. This is an impressive result considering that this forecast is issued six months before the start of the "official" hurricane season and eight months before the active portion of the hurricane season. The latter forecasts of early June and early August make substantial use out of physical parameters which affect the Atlantic hurricanes (e.g. ENSO conditions, sea level pressure anomalies, upper tropospheric zonal winds, etc) and which also have the tendency to persist from the forecast date through the peak of the season. This is not feasible for the early December forecasts with such a long lead time, especially for ENSO's upcoming state because of the difficulty in obtaining skill across the March-May "predictability barrier" (Wright 1985, Wright et al. 1988).

The 1 June seasonal tropical cyclone forecast incorporates elements from the 1 December forecast as well as adding in more timely information from the most recent few months (Gray et al.1994), most importantly being an indication of ENSO's evolving state. There are 13 predictors in five groups as listed in Table 1 used in this forecast. Fig. 1 shows the locations of these various predictors. As with the 1 December forecast, three of the predictors are for extrapolating the state of the QBO expected during September - zonal winds at 50 mb, 30 mb, and the vertical shear between the two layers. Four predictors involve North African surface parameters. Two of these, the Gulf of Guinea and western Sahel rainfall, were described in the previous section. The other two North African predictors are the anomalous surface temperature and sea level pressure gradients from February through May of the current year. The remaining six predictors involve conditions over the Caribbean Sea (April to May sea level pressure anomalies and 200 mb zonal wind anomalies) and current information regarding the strength and trend of ENSO.

The new predictors include two North African surface predictors which relate to the pre-rainy season conditions over sub-Saharan North Africa. When zonal surface temperature and sea level pressure gradients during February through May are relaxed as the monsoon onset begins, the Sahel rainfall and Atlantic hurricane activity are stronger than normal. Conversely, when the surface temperature and sea level pressures have tightened gradients from the west coast to the interior, the Sahel rainfall is reduced and the Atlantic hurricane activity is quieter than normal. These surface conditions act to alter the strength of the southwesterly monsoon flow into the Sahel. Over the Caribbean, April and May sea level pressure and 200 mb zonal wind anomalies - a reliable measure of the crucial vertical wind shear variations - are utilized as predictors for the hurricane season. The pre-season sea level pressure anomalies and the 200 mb zonal winds over the Caribbean have a tendency to persist into the heart of the hurricane season and thus are useful as predictors of the hurricane activity. The last four predictors give indications of the current strength of ENSO and its trend in the previous few months: the April and May equatorial eastern Pacific SSTs and the SOI and their change between January/February to April/May. These values provide reliable indications about how ENSO will likely behave during August through October, the peak crucial Atlantic basin hurricane months.

With the use of these 13 predictors, the hindcast testing is able to anticipate between 50% and 70% of the variability by 1 June. This should degrade to 25-55% of the variability in independent real-time (operational) forecasts, demonstrating a substantial improvement over the skill levels that are suggested for our 1 December forecasts. If these atmospheric and oceanic relationships are stable, then substantial independent real-time forecast skill is available.

For the final initial time forecast of 1 August, information is utilized that extends right up to the start of the active portion of the hurricane season (Gray et al. 1993). This forecast may appear to be more of a "nowcast" than a prediction when one recalls that the "official" Atlantic hurricane season extends from June through November. However, an inspection of the seasonal variation of named storms and hurricanes reveals that only 11% and 6% of the annual named storm and hurricane activity (as measured by days in which these cyclones are present) respectively, occurs before 1 August on average (Landsea 1993). Less than 2% of the intense hurricane activity is observed on average before 1 August and 95% occurs just in the three months of August through October. Additionally, the small amount of activity that does occur in June or July has shown no predictive value for the entire season: a busy (e.g., two or three named storms) June and July can precede a very active year (such as 1990 when 14 named storms occurred) or a very quiet year (such as 1986 when only six named storms were observed). Alternatively, quiescent (e.g., with no named storms observed) June and July years can either precede very active years (such as 1988 with 12 named storms) or very quiet seasons (such as 1983 with only four named storms observed).

Nine predictors in four predictor groupings (listed in Table 1 and the locations of which are shown in Fig. 1) are used in the 1 August forecast (Gray et al. 1993); all but one of which are simply updates of predictors described earlier. The QBO measures of 50 mb and 30 mb zonal winds and the vertical shear between the two levels through July are extrapolated two months forward to September. The Caribbean sea level pressure anomalies and 200 mb zonal wind anomalies are again utilized, but now updated for the months of June and July. In addition, the June and July values of SSTA and SOI are used for a current indication of ENSO's phase and strength. The Caribbean Sea and ENSO predictors are useful as a consequence of their strong tendency to persist through the remainder of the hurricane season. The previous year August through November Gulf of Guinea rainfall is utilized, but in combination with the one additional predictor - the rainfall anomaly in the western Sahel during June and July. Since the rainy season usually commences during these two months, this rainfall index provides a reliable idea of the early summer strength of the monsoon in its effect on the Sahel. Typically, the use of June and July rainfall provides a useful indication of how rainy the remaining two months of August and September of the rainy season will be (Bunting et al. 1975, Gray et al. 1994). Because of the strong concurrent correlation between Atlantic tropical cyclone activity and seasonal Sahel rainfall, this June and July western Sahel rainfall provides an excellent precursor signal for the hurricane activity from August until the end of the hurricane season, particularly for the expected intense hurricane activity. Note that these more recent rainfall measurements replace the previous year August and September western Sahel rainfall anomalies.

The skill levels based upon hindcast testing range between 45 and 60% of the variability explained by 1 August. In real-time independent forecast testing, the amount of skill likely to be available will be in the range of 25-40%. While this is an improvement over the hindcast skill available by 1 December, it is somewhat lower than what may be possible by 1 June, two months earlier. This is due to an improvement of the forecast scheme for the 1 June lead time to which (Gray et al. 1994) have allowed it to perform better than the older version (Gray et al. 1993) of the 1 August scheme.

Current work is underway to reduce the number of predictors for all of the lead times, to include the years of the early 1990s and to only select those predictors that contribute a reasonable amount of variability toward the regression equation. One particular change will be to utilize the "Niño 3.4" region (5N-5S, 120-170W) in place of both the SOI and the original ENSO SST index (Niño 3), which was farther to the east. The Niño 3.4 index has been identified as the SST region having strongest concurrent association with mid-latitude and tropical ENSO-forced circulation variations (Barnston et al. 1997).

Regardless of the exact performance of the published regression schemes in Gray et al. (1992, 1993, 1994) in the future, there are now thirteen years of forecasts that have issued in real-time by Prof. Gray and his collaborators at Colorado State University. As in any real-time forecasting situations, the seasonal forecasts have not solely relied upon the quantitative regression results in Gray (1984b) and Gray et al. (1992, 1993, 1994). The forecasts issued also give some weight to consistency between predictands, predictive factors not explicitly in the regression model, and forecaster intuition. Thus the forecast results presented below are the final "official" forecasts and are not strictly the regression model results. A full independent verification of LAD regression results presented in Gray et al. (1992, 1993, 1994) will need to wait until a larger sample (at least 10 years) is available.

In most of the prior real-time forecasts from 1984-1997, predictions have beaten climatology and persistence, which were previously the only way to estimate future hurricane activity. Figure 3 presents the real-time (operational) seasonal early June forecasts of hurricanes. The eight early June seasonal forecasts for 1985, 1986, 1987, 1990, 1991, 1992, 1994, and 1995 were more accurate in general than climatology for both named storms and hurricanes (1950-1990 mean value of 9.3 named storms and 5.8 hurricanes). The forecasts for 1984, 1988 and 1996 were about as successful as climatology, while the three seasonal forecasts for 1989, 1993 and 1997 were failures. To quantify the amount of skill available, the agreement coefficient,  $\rho$ , is utilized to compare the real-time forecasts against the observations. The early June predictions have explained about 20% of the variability for named storms and hurricanes, significantly greater than that available by persistence (3 and 7%, respectively) and by climatology (0%). The early June intense hurricane forecasts have yet to show significant skill, however, eight years is too small a test database to say anything definitive. The early December forecasts have too small a sample size (six years) of independent data to come to any conclusions as of yet. On the other hand, the early August forecasts for all of the tropical cyclone parameters show increased, significant skill over and above the early June predictions - up to 50% of the named storm and 35% of the hurricane variability. These values of variability explained for the early June and early August named storm and hurricane forecasts are in the range, and even higher than for the 1 August forecasts, of the expected independent skill discussed earlier. Real-time forecast

and verification reports for all of these forecast dates during the last several years are now available via the World Wide Web: <<http://tropical.atmos.colostate.edu/>>.

### III. Discussion and Conclusions

A sensible question would be how can seasonal forecasts of tropical cyclones be used when they are for large geographic regions such as the entire North Atlantic Ocean, Caribbean Sea and Gulf of Mexico. There are a number of reasons for issuing such predictions. Practically, most people in the general public cannot - and should not - utilize the forecast directly. As an example, it would be foolish if John Q. Public decided to ignore hurricane preparedness and mitigation plans because the year was one predicted to be below average. 1992 serves as an excellent warning against such actions: the Atlantic hurricane season was very successfully forecasted by Prof. Gray as a quiet year with only four hurricanes, yet one of those was Hurricane Andrew - the most destructive U.S. hurricane on record (Mayfield et al. 1994). Strong wording should be added to any seasonal hurricane forecast to discourage an individual from using the forecast in such a way.

Corporations and governments, however, because of their size and scope of operations, are starting to make reasonable use of such forecasts each year. One large, private manufacturing company with interests all along the U.S. coastline serves as an example of the many utilizations that have been made with these predictions: decisions on the amount of "hurricane" liability insurance that covers preparations, damages and repair costs; determinations of annual budgets and preventative maintenance schedules; an aid in the production and inventory storing planning; plans for data processing disaster recovery; and schedules for workers' shifts in the upcoming year. Such usage can be better enhanced by increases in skill, by providing longer-range accurate predictions, and by regionalizing the forecast for smaller locales (such as being pursued by Lehmiller et al. [1997]).

Another justification for such forecasting efforts is that it leads to further advances in our understanding of linkages in the climate system. It was the failure of the 1989 seasonal Atlantic hurricane forecast that led to the discovery that the West African monsoon is intimately tied to the occurrence of Atlantic hurricanes on an interannual basis. Successes in seasonal tropical cyclone activity may also provide insight into forecasts of other tropical phenomena such as droughts/flooding associated with anomalous changes in the strength and location of the ITCZ and the monsoons (e.g. Hastenrath 1995).

Finally, the seasonal tropical cyclone forecasts at times generate public and media interest, whether or not individuals can actually make use of the predictions. A beneficial side effect of such interest is that it heightens the awareness of the public to the danger of hurricanes and hopefully prompts more people to take precautions and make preparations.

### References

- Barnston, A. G., M. Chelliah, and S. B. Goldenberg (1997): What part of the tropical Pacific SST most represents the ENSO? Accepted to *Atmos. Ocean*.
- Bunting, A. H., M. D. Dennett, J. Elston, and J. R. Milford (1975): Seasonal rainfall forecasting in West Africa. *Nature*, **253**, 622-623
- Elsner, J. B., and C. P. Schmertmann (1994): Assessing forecast skill through cross validation. *Wea. Forecasting*, **9**, 619-624.
- Folland, C. K., T. N. Palmer, and D. E. Parker (1986): Sahel rainfall and worldwide sea temperatures, 1901--1985. *Nature*, **320**, 602-607.
- Gray, W. M. (1984a): Atlantic seasonal hurricane frequency: Part I: El Niño and 30 mb quasi-biennial oscillation influences. *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 1649-1668.
- Gray, W. M. (1984b): Atlantic seasonal hurricane frequency: Part II: Forecasting its variability. *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 1669-1683.
- Gray, W. M., C. W. Landsea, P. W. Mielke, Jr., and K. J. Berry (1992): Predicting Atlantic seasonal hurricane activity 6-11 months in advance. *Wea. Forecasting*, **7**, 440-455
- Gray, W. M., C. W. Landsea, P. W. Mielke, Jr., and K. J. Berry (1993): Predicting Atlantic basin seasonal tropical cyclone activity by 1 August. *Wea. Forecasting*, **8**, 73-86.

Gray, W. M., C. W. Landsea, P. W. Mielke, Jr., and K. J. Berry (1994): Predicting Atlantic basin seasonal tropical cyclone activity by 1 June. *Wea. Forecasting*, **9**, 103-115.

Hastenrath, S. (1995): Recent advances in tropical climate prediction. *J. Climate*, **8**, 1519-1532.

Lamb, P. J. (1978): Large-scale tropical Atlantic surface circulation patterns associated with sub-Saharan weather anomalies. *Tellus*, **30**, 240-251.

Landsea, C. W. (1993): A climatology of intense (or major) Atlantic hurricanes. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 1703-1713.

Landsea, C. W. and W. M. Gray (1992): The strong association between Western Sahel monsoon rainfall and intense Atlantic hurricanes. *J. Climate*, **5**, 435-453.

Lehmiller, G. S., T. B. Kimberlain, and J. B. Elsner (1997): Seasonal prediction models for North Atlantic basin hurricane location. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 1780-1791.

Mayfield, M., L. Avila, E. N. Rappaport (1994): Atlantic hurricane season of 1992. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 517-538.

Mielke, P. W., Jr. (1991): The application of multivariate permutation methods based upon distance functions in the earth sciences. *Earth--Sci. Rev.*, **31**, 55-71.

Mielke, Jr., P. W., K. J. Berry, C. W. Landsea, and W. M. Gray (1996): Artificial skill and validation in weather forecasting. *Wea. Forecasting*, **11**, 153-169.

Nicholson, S. E. (1988): Land surface-atmosphere interaction: Physical processes and surface changes and their impact. *Progr. Phys. Geogr.*, **12**, 36-65.

Watterson, I. G., J. L. Evans, and B. F. Ryan (1995): Seasonal and interannual variability of tropical cyclogenesis: Diagnostics from large-scale fields. *J. Climate*, **8**, 3052-3066.

Wright P. B. (1985): The Southern Oscillation: An ocean-atmosphere feedback system? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **66**, 398-412.

Wright, P. B., J. M. Wallace, T. P. Mitchell, and C. Deser (1988): Correlation structure of the El Niño/Southern Oscillation phenomenon. *J. Climate*, **1**, 609-625.

Wu, G. and N. Lau (1992): A GCM simulation of the relationship between tropical-storm formation and ENSO. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 958-977.

Xue, Y. and J. Shukla, J. (1993): The influence of land surface properties on Sahel climate. Part I: Desertification. *J. Climate*, **6**, 2232-2245.

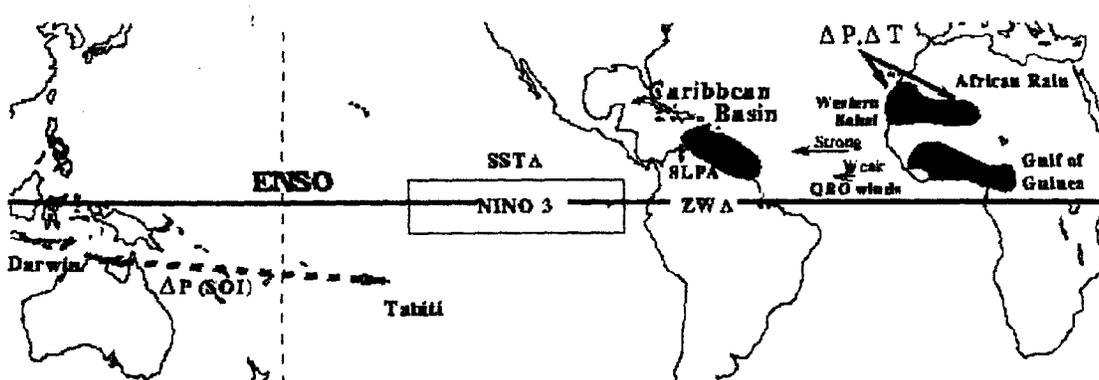


Figure 1: Location of meteorological and oceanographical parameters used in the Atlantic seasonal forecasts by Gray et al. See the text for details.

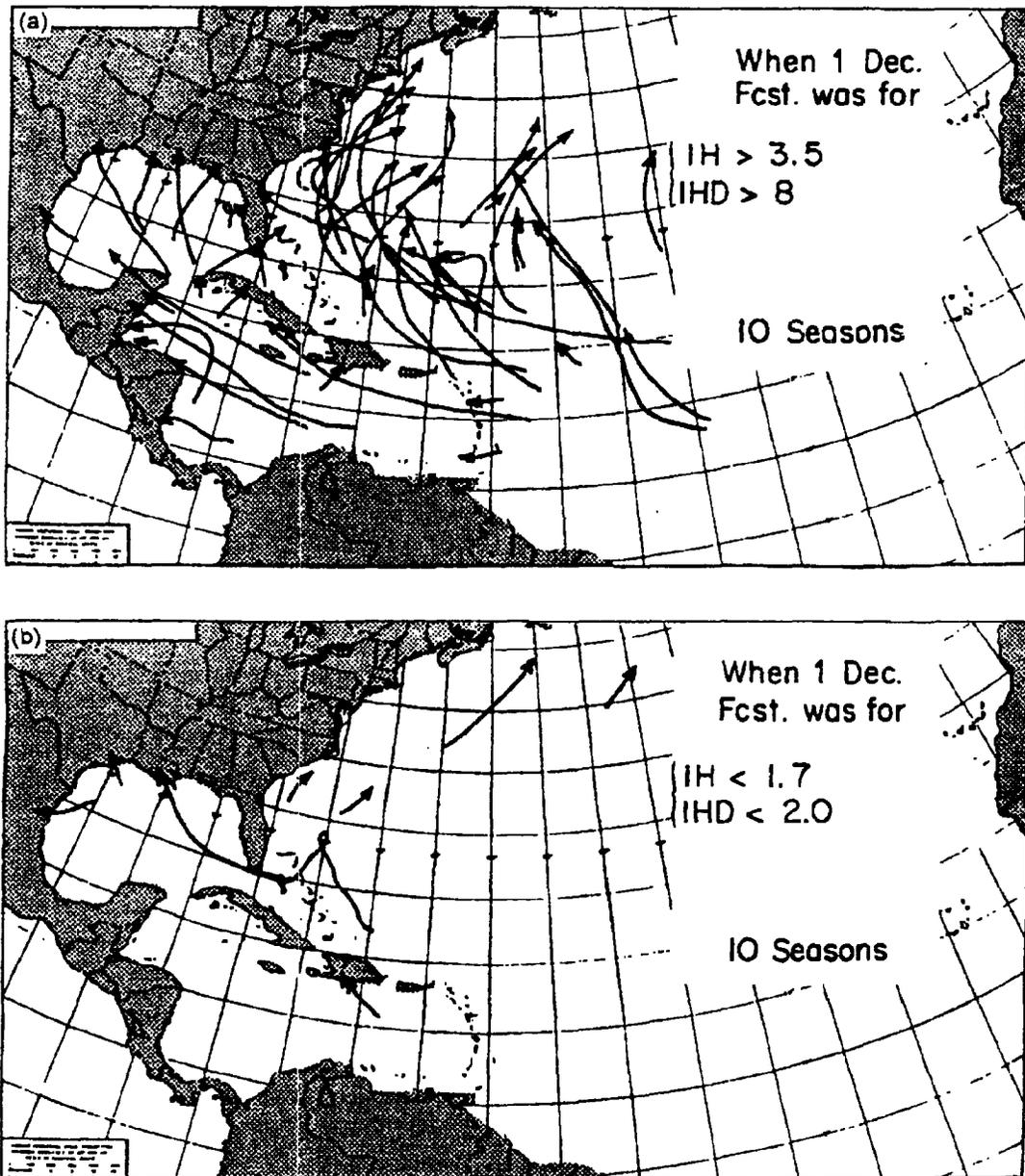


Figure 2: Contrast of observed intense hurricane tracks between 1950 and 1990 from the 10 most active hindcast ( $>3.5$  intense hurricanes [IH] and  $> 8.0$  days of intense hurricanes [IHD] occurring) seasons versus the 10 calmest hindcast seasons ( $<1.7$  IH and  $< 2.0$  IHD) from a 1 December of the previous year initial forecast date. The ratio of observed IHD between the two composites is 9.5 to 1.

## 1 June Hurricane Forecasts 1984-1997; $r=0.45$

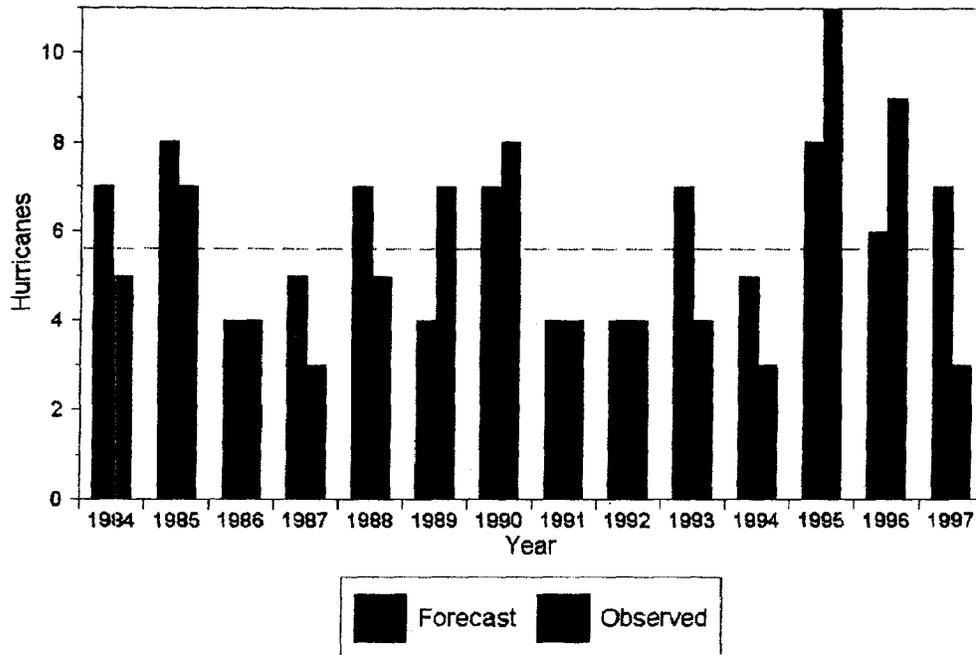


Figure 3: Performance of real-time early June seasonal hurricane forecasts by Prof. Bill Gray and collaborators from 1984-1997. Purple bars are the operational forecast values, black bars are the verification for that year and the green line is the climatological value of 5.8 hurricanes per year.

## Los ciclones tropicales que afectan a Cuba y su lugar de origen.

*Miriam E. Limia Martínez Dpto. Investigaciones para la Predicción Meteorológica, Instituto de Meteorología. Apartado 17032, Habana 17, cp 11700, Fax 33 8010, e-mail meteor@ceniai.inf.cu*

**RESUMEN:** Se realiza un análisis del lugar donde se originan los ciclones tropicales que han afectado al archipiélago cubano desde 1919, atendiendo a una división del Atlántico Norte en seis regiones ciclogénicas y por franjas de latitud y longitud. Se analiza el comportamiento en los últimos años, tomando como división la fecha en que azotó a Cuba el último huracán de gran intensidad.

**ABSTRACT:** The origin of Tropical Cyclones affecting Cuban Archipelago since 1919 is analyzed by means of two different partition in the North Atlantic Ocean. The basic information comprises two special chronological subsets according the date that the last great intensity Hurricane reported in Cuba.

### Introducción.

Cada vez que se forma un ciclón tropical, es de sumo interés para los seres humanos, sobre todo para aquellos que viven en las regiones del mundo azotadas por los mismos, conocer si este afectará el lugar donde reside. Limia (1975), utilizando la división hecha por Cry (1962) del Atlántico Norte en seis regiones ciclogénicas (ver figura 1), encontró que en las regiones II y IV se formaban el 63.6% y 22.0% respectivamente del total de organismos que afectaron a Cuba. En el presente trabajo se realiza un análisis del lugar donde se originaron los ciclones tropicales (considerando como origen el punto donde alcanzan el estadio de tormenta tropical) que afectaron a Cuba, por meses, desde 1919 hasta 1991. También, se analiza por franjas de latitud y longitud, con el objetivo de encontrar zonas más específicas donde prioritariamente se formaron y cómo éstas han evolucionado en los últimos años.

La información utilizada se obtuvo del Sistema de Información Estadística (SIE) (García y Beauballet, 1992) y de los Mapas de Trayectorias elaborados por el Dpto. de Pronósticos del Tiempo del INSMET. Se consideró la división del Atlántico Norte efectuada por Cry (1962) y se tomaron franjas de 2,5° de latitud y de 10° de longitud, que abarcan el área comprendida entre 7.5° N y 40.0° N y los 20.0° W y 100.0° W, las que se muestran en la figura 2. El análisis por meses se realizó tomando como referencia la fecha de formación del ciclón tropical. Es necesario señalar que la información utilizada presenta diferencias con la reportada por Neumann et. al (1993), pero las mismas no modifican las conclusiones a las que se arriban en el presente trabajo.

No se ejecuta una valoración estadística de las diferencias entre las medias en el presente trabajo, ya que los ciclones tropicales son fenómenos del tipo Poisson debido a su baja frecuencia de ocurrencia, y a que las dójimas para la comparación de las medias entre grupos se aplican a variables con distribución Normal, por lo que sólo se realizará una evaluación descriptiva.

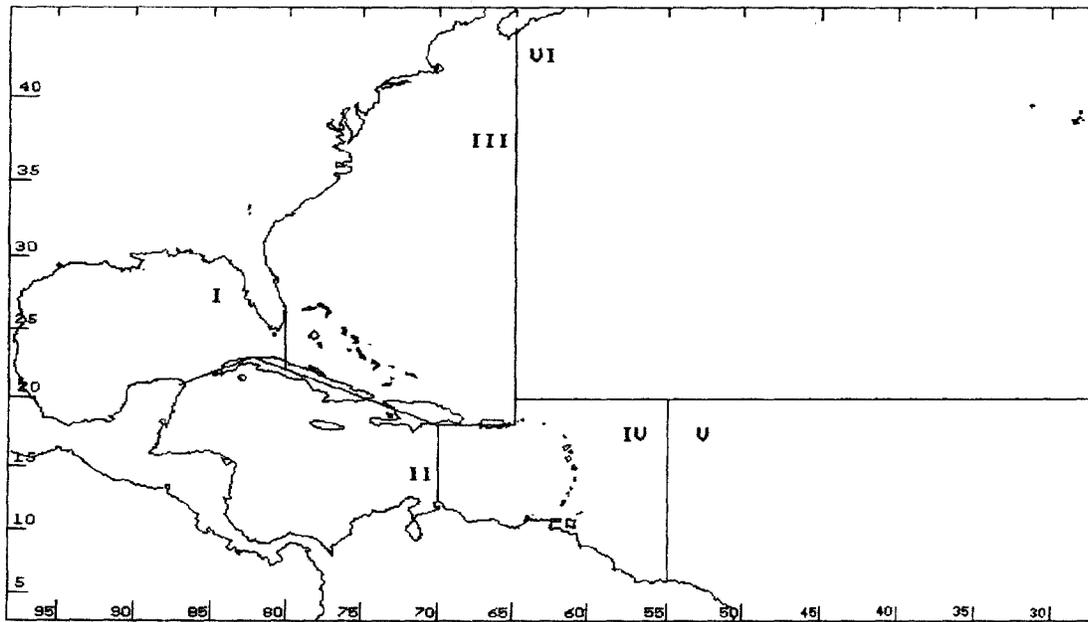


Fig. 1. Zonas de surgimiento según C. W. Cry.

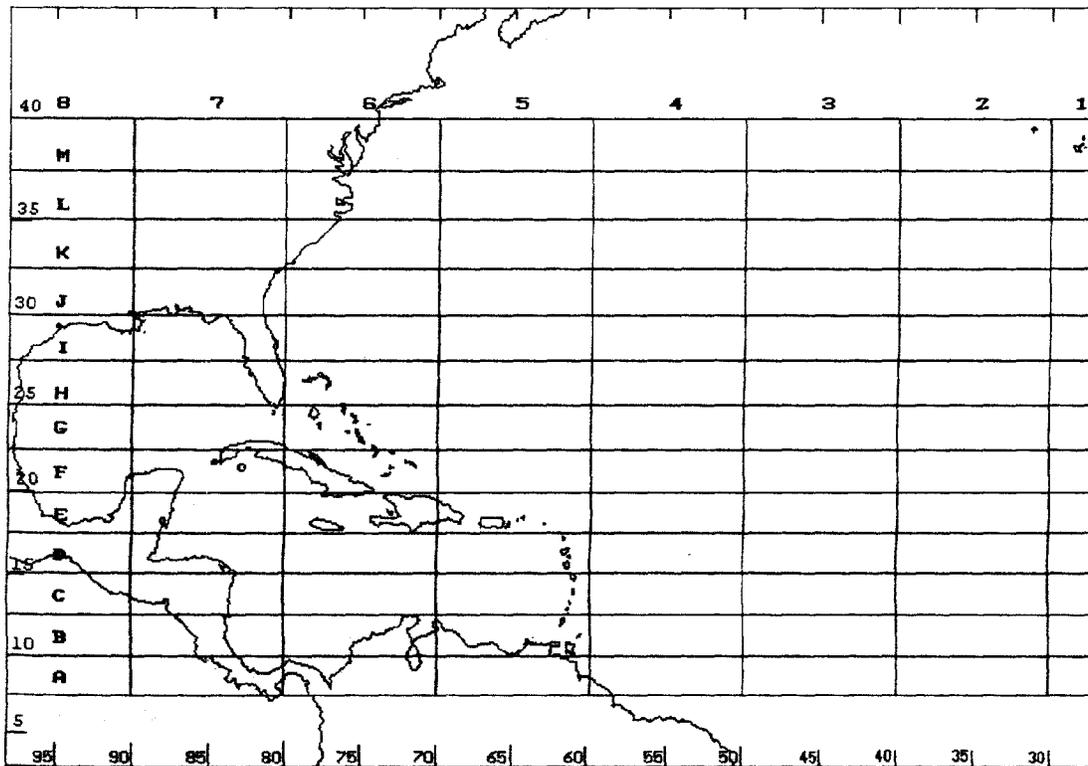


Fig. 2. Cuadrículas de 2.5 ° de latitud por 10 ° de longitud.

## Resultados.

Considerando las seis regiones descritas por Cry (1962), se tiene que nos ha afectado el 1% de los organismos formados en la región I (Golfo de México), el 42.3% de los formados en la región II (Mar Caribe occidental), el 4.2% de los formados en la III, el 14.6% de los formados en la IV (Mar Caribe oriental incluyendo parte del Atlántico al W de 55°), el 10.7% de los formados en la V y el 1.6% de los formados en la VI. Resultaron de interés las regiones II, IV y V, principalmente la II donde surgieron el 58.7% del total de los organismos que afectaron a Cuba en el período considerado.

Tabla 1. Valores medios de formación de ciclones tropicales y de afectación a Cuba por zonas de origen.

Origen	Zona I		Zona II		Zona III		Zona IV		Zona V		Zona VI	
	1er	2do	1er	2do	1er	2do	1er	2do	1er	2do	1er	2do
Formados	1.24	1.46	1.82	1.08	1.00	1.56	1.97	0.92	0.41	1.56	0.82	0.92
Afec a Cuba	-	0.03	0.79	0.44	0.09	0.03	0.32	0.10	-	0.21	-	0.03

Si se tienen en cuenta dos períodos, uno desde 1919 hasta 1952 (34 años), y el otro desde 1953 hasta 1991 (39 años), tomando como referencia el año 1952 debido a que después de este año Cuba no ha sido afecta directamente por un huracán de gran intensidad, se infiere de la Tabla 1 que ha ocurrido una disminución de 1.69 y 2.14 veces en el surgimiento de ciclones tropicales en las regiones II y IV respectivamente y un aumento de 1.56 y 3.8 veces en la formación en las regiones V y III correspondientemente. Atendiendo a la afectación a Cuba existe una consecuente disminución en la afectación por los ciclones tropicales procedentes de las regiones II y IV con 1.80 y 3.24 veces. Sin embargo, en las regiones donde hubo aumento no se comportó de igual forma, en la región III ocurrió un aumento de 1.56 veces en la formación, mientras que respecto a la afectación lo que hubo fue una disminución de 3.0 veces y en la región V fue mayor el aumento en la afectación que en la formación.

Tabla 2. Valores medios de la formación de ciclones tropicales por zonas de origen.

Origen	Zona I		Zona II		Zona III		Zona IV		Zona V		Zona VI	
	1er	2do	1er	2do	1er	2do	1er	2do	1er	2do	1er	2do
Mes \ período												
Mayo	0.03	0.03	0.06	0.08	0.03	-	-	-	-	-	0.09	0.10
Junio	0.06	0.33	0.26	0.08	0.03	0.05	0.06	0.03	-	0.03	-	-
Julio	0.18	0.21	-	0.06	0.15	0.15	-	0.10	-	0.06	-	0.03
Agosto	0.26	0.28	0.15	0.15	0.18	0.38	1.15	0.18	0.06	0.62	0.24	0.18
Septiembre	0.47	0.46	0.47	0.23	0.35	0.59	0.59	0.46	0.29	0.82	0.24	0.44
Octubre	0.21	0.15	0.74	0.31	0.24	0.33	0.15	0.13	0.06	0.05	0.25	0.13
Noviembre	-	0.03	0.12	0.18	0.03	0.03	-	0.03	-	-	-	-

Un análisis comparativo por meses de la información de la Tabla 2. mostró lo siguiente:

Las mayores variaciones ocurrieron en el mes de agosto en las regiones V, IV y III con aumentos en la formación en el 2<sup>do</sup> período de 10.3 y 2.1 veces (respecto a la media del 1<sup>er</sup> período) en las regiones V y III respectivamente y una disminución de 6.4 veces en la región IV. En junio también existieron diferencias notorias, pero fueron en las regiones I y II, con un aumento hacia el 2<sup>do</sup> período de 5.5 veces en la I y una disminución de 3.25 veces en la II. Variaciones mayores de 2.0 veces la media ocurrieron en los meses de septiembre y octubre con una disminución en el 2<sup>do</sup> período en la región II en ambos meses y un aumento en septiembre en la región V para el mismo período.

Con respecto a Cuba se observó que:

Las mayores variaciones ocurrieron en el mes de agosto en las zonas IV y V con disminución de 0.24 a 0.0 y aumento de 0.0 a 0.13 respectivamente en el 2<sup>do</sup> período. En septiembre se registró un aumento en la afectación de los organismos originados en las regiones IV y V y una disminución en la de los provenientes de la región II, siendo notorios dos aspectos: i) la disminución de la afectación de los formados en la región II es muy superior a la disminución de la propia formación de ciclones tropicales (5.0 y 2.0 veces), ii) hubo aumento en la afectación por los originados en la región IV, mientras que ocurrió una ligera disminución en la formación. Lo más distintivo del mes de octubre es la gran disminución de la afectación en 4.5 veces de los organismos formados en la región II si se compara con la disminución ocurrida en la formación en dicha región (2.5 veces), como puede observarse de la comparación de las Tablas 2 y 3.

Tabla 3. Valores medios de la afectación a Cuba de los ciclones tropicales por zonas de origen.

Origen Mes \ período	Zona I		Zona II		Zona III		Zona IV		Zona V		Zona VI	
	1er	2do	1er	2do	1er	2do	1er	2do	1er	2do	1er	2do
Mayo	-	-	-	0.08	-	-	-	-	-	-	-	-
Junio	-	0.03	-	0.08	-	-	0.06	-	-	-	-	-
Julio	-	-	-	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-
Agosto	-	-	0.03	0.03	0.03	0.03	0.24	-	-	0.13	-	-
Septiembre	-	-	0.15	0.03	-	-	0.03	0.08	-	0.08	-	-
Octubre	-	-	0.59	0.13	0.03	-	0.03	0.03	-	-	-	-
Noviembre	-	-	0.08	0.03	0.03	-	-	0.03	-	-	-	-

A pesar de las mejoras alcanzadas en los medios observacionales con la llegada de los Satélites Meteorológicos, los cambios observados en el segundo período pudieran ser un reflejo de las variaciones ocurridas en la influencia anticiclónica en la región, señaladas por Naranjo y Centella(1996), las cuales han repercutido en el clima de Cuba. (Naranjo et. al en Centella, Naranjo y Paz, 1996).

Al dividir el área de estudio según las cuadrículas mostradas en la figura 2 en la cual se utiliza la siguiente simbología:

- |  |  |
|--|--|
| <b>A</b> 7.5° < latitud de formación ≤ 10.0°N  | <b>1</b> 20.0° < longitud de formación ≤ 30.0°W  |
| <b>B</b> 10.0° < latitud de formación ≤ 12.5°N | <b>2</b> 30.0° < longitud de formación ≤ 40.0°W  |
| <b>C</b> 12.5° < latitud de formación ≤ 15.0°N | <b>3</b> 40.0° < longitud de formación ≤ 50.0°W  |
| <b>D</b> 15.0° < latitud de formación ≤ 17.5°N | <b>4</b> 50.0° < longitud de formación ≤ 60.0°W  |
| <b>E</b> 17.5° < latitud de formación ≤ 20.0°N | <b>5</b> 60.0° < longitud de formación ≤ 70.0°W  |
| <b>F</b> 20.0° < latitud de formación ≤ 22.5°N | <b>6</b> 70.0° < longitud de formación ≤ 80.0°W  |
| <b>G</b> 22.5° < latitud de formación ≤ 25.0°N | <b>7</b> 80.0° < longitud de formación ≤ 90.0°W  |
| <b>H</b> 25.0° < latitud de formación ≤ 27.5°N | <b>8</b> 90.0° < longitud de formación ≤ 100.0°W |
| <b>I</b> 27.5° < latitud de formación ≤ 30.0°N |  |
| <b>J</b> 30.0° < latitud de formación ≤ 32.5°N |  |
| <b>K</b> 32.5° < latitud de formación ≤ 35.0°N |  |
| <b>L</b> 35.0° < latitud de formación ≤ 37.5°N |  |
| <b>M</b> 37.5° < latitud de formación ≤ 40.0°N |  |

Se observa de la Tabla 4 que la franja de latitud de mayor frecuencia de formación está entre 15.0° y 17.5°N, seguida de la comprendida entre 17.5° y 20.0°N. Los ciclones tropicales se

forman en latitudes más bajas en los meses de julio, agosto y septiembre, en junio lo hacen predominantemente entre 22.5° y 25.0°N, en agosto lo hacen principalmente entre 12.5° y 20.0°N extendiéndose en septiembre este predominio hasta 22.5°N, en octubre las mayores frecuencias ocurren algo más al norte entre 15.0° y 25.0°N.

Tabla 4. Valores medios del número de ciclones tropicales formados por franjas de latitud.

MES	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Mayo	-	-	0.05	-	0.01	0.01	-	0.01	0.03	-	-	-	-
Junio	-	0.07	0.03	0.05	0.05	0.11	0.05	0.04	0.04	-	0.01	-	-
Julio	0.01	-	0.05	0.07	0.04	0.08	0.09	0.07	0.03	0.05	0.01	0.01	-
Agosto	0.03	0.12	0.34	0.28	0.32	0.16	0.15	0.22	0.08	0.04	0.03	-	0.04
Septiembre	0.03	0.19	0.39	0.38	0.41	0.42	0.24	0.26	0.19	0.12	0.15	0.03	-
Octubre	-	0.12	0.08	0.30	0.18	0.22	0.20	0.08	0.08	0.04	0.03	-	-
Noviembre	-	-	0.05	0.05	0.07	0.07	0.04	-	0.01	-	-	-	-
Temporada	0.07	0.50	1.00	1.14	1.08	1.07	0.78	0.68	0.46	0.26	0.14	0.04	0.04

Con respecto a las longitudes la franja de mayor formación fue la comprendida entre 60.0° y 70.0°W, seguida por las franjas 50.0° / 60.0°W y 80.0° / 90.0°W con medias de 1.72 y 1.64 respectivamente. En los meses de mayo, junio y octubre la mayor formación ocurre en la franja 80.0° / 90.0°W, mientras que en septiembre ocurre más al este entre 50.0° y 70.0°W, y en agosto principalmente entre 50.0° y 60.0° W, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Valores medios del número de ciclones tropicales formados por franjas de longitud.

MES	1	2	3	4	5	6	7	8
Mayo	-	-	-	-	0.03	0.03	0.08	-
Junio	-	-	-	0.01	0.04	0.04	0.24	0.12
Julio	-	-	0.03	0.07	0.09	0.11	0.09	0.14
Agosto	-	-	0.16	0.64	0.39	0.26	0.26	0.11
Septiembre	-	0.01	0.26	0.78	0.55	0.39	0.29	0.31
Octubre	-	-	0.03	0.18	0.24	0.35	0.45	0.08
Noviembre	-	-	-	0.04	0.08	0.04	0.12	0.01
Temporada	-	0.01	0.47	1.72	2.16	1.22	1.64	0.77

Con respecto a Cuba se observó que las principales afectaciones se deben a organismos formados entre 12.5° y 17.5°N, no ocurriendo ninguna afectación por ciclones tropicales que surgieron por encima de 22.5°N. Las mayores frecuencias de formación varían en latitud según los meses en mayo ocurren entre 12.5° y 15.0°N, en junio mucho más al norte entre 20.0° y 22.5°N, en agosto hay dos máximos uno entre 12.5° y 15.0°N y otro entre 17.5° y 20.0°N, en octubre el predominio ocurre entre 15.0° y 17.5°N, sin embargo la más notable es la franja 12.5° / 15.0°N donde el 100% de los organismos formados afectó alguna parte del archipiélago cubano, según se puede observar en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores medios del número de ciclones tropicales que afectaron a Cuba según su lugar de origen por franjas de latitud.

MES	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
Mayo	-	-	0.03	-	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-
Junio	-	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	-	-	-	-	-	-	-
Julio	-	-	-	-	0.01	-	-	-	-	-	-	-	-
Agosto	-	0.03	0.07	0.05	0.07	0.01	-	-	-	-	-	-	-
Septiembre	-	0.03	0.04	0.05	0.03	0.03	-	-	-	-	-	-	-
Octubre	-	0.07	0.08	0.16	0.04	0.03	-	-	-	-	-	-	-
Noviembre	-	-	0.03	0.01	0.04	0.01	-	-	-	-	-	-	-
Temporada	-	0.14	0.26	0.28	0.22	0.11	-	-	-	-	-	-	-

En relación con las longitudes, según se aprecia en la Tabla 7, es notorio el fuerte predominio en la afectación por los ciclones tropicales formados entre 80.0° y 90.0°W con una media de 0.45 para toda la temporada, observándose también el predominio en esta franja en el mes de octubre que concuerda con la mayor formación en estas longitudes. En agosto existe un ligero aumento en la afectación por los formados entre 60.0° y 70.0°W, mientras que la mayor formación ocurre entre 50.0° y 60.0°W.

Tabla 7. Valores medios del número de ciclones tropicales que afectaron a Cuba según su lugar de origen por franjas de longitud.

MES	1	2	3	4	5	6	7	8
Mayo	-	-	-	-	-	-	0.03	-
Junio	-	-	-	-	0.03	-	0.05	-
Julio	-	-	-	-	-	-	0.01	-
Agosto	-	-	0.04	0.07	0.08	0.03	0.01	-
Septiembre	-	-	-	0.07	0.04	0.07	0.04	-
Octubre	-	-	-	0.01	0.01	0.12	0.23	-
Noviembre	-	-	-	-	0.03	0.03	0.05	-
Temporada	-	-	0.04	0.15	0.19	0.19	0.45	-

### Conclusiones y recomendaciones.

- Se ha observado un aumento en la formación de ciclones tropicales por debajo de los 20°N (región V) en el período comprendido entre 1953-1991, principalmente en los meses de agosto y septiembre, así como también un aumento en la formación al norte de Cuba entre 65.0° y 80.0°W (región III), fundamentalmente en septiembre.
- La formación de organismos tropicales disminuyó en el segundo período en las regiones II y IV, predominantemente en junio, octubre y septiembre para la región II y en agosto para la IV.
- La disminución en la afectación de los organismos tropicales originados en la región II es muy superior a la disminución ocurrida en la formación.
- Resultó de suma importancia la franja de longitud entre 12.5° y 15.0°N en el mes de octubre donde el 100% de los organismos formados afectó el archipiélago cubano, aunque es bueno destacar que la formación de ciclones tropicales en esta franja, para este mes, es baja (6 %).

Sería de interés continuar el estudio más pormenorizado y con un respaldo estadístico más profundo debido a las particularidades encontradas en este análisis.

**Referencias.**

CENTELLA A., L. R. NARANJO, L. R. PAZ (1997): Variaciones y Cambios del Clima en Cuba, Centro Nacional del Clima, Instituto de Meteorología, 59 pags.

CRY C.W., W.H. HAGGARD (1962): North Atlantic Tropical Cyclones activity,1901-1960, Monthly Weather Review, vol.90, N°8.

GARCIA A.,P. BEAUBALLET (1992): Sistema de información estadística SIE., Trabajos del 1<sup>er</sup> Congreso Iberoamericano de Met. Trop., Tomo 1, p 299-302.

LIMIA M.E. (1975): Climatología y estadística de los ciclones tropicales en Cuba, Biblioteca INSMET.,p 15.

NEUMANN, C. J., JARVINEN, B. R., MC ADIE, C. J. Y ELMS, J. D. (1993): Tropical Cyclones of the North Atlantic Ocean (1871-1992). Historical Climatology Series 6-2. 193 pags.

NARANJO, L.R. Y A. CENTELLA (1996): Variaciones interanuales de los campos meteorológicos sobre el Caribe y el Golfo de México. Parte I: Presión a nivel del mar y altura en 500hPa. Propuesto para publicar en Inter. Journ. Of Clim., 20 pags.

## HURRICANE LILI TRACK PREDICTION USING THE MM5 MODEL. (AN EXPERIMENT)

*Rafael Pérez Parrado<sup>1</sup>, Terry T. Keller<sup>2</sup> and Thomas T. Warner<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Instituto de Meteorología, Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente, La Habana*

<sup>2</sup> *National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado.*

**RESUMEN:** EL modelo MM5 ha estado bajo continuo desarrollo y monitoreo por mas de 25 años . Este modelo conocido como el modelo de la comunidad está disponible y en uso público en muchos lugares alrededor del mundo. Recientemente este modelo ha sido utilizado por científicos cubanos en forma experimental. La primera tentativa fue la de utilizarlo en el pronóstico de la trayectoria de los ciclones tropicales. Así se realizaron experimentos en el pronóstico de la trayectoria del huracán Lili para periodos de hasta 48 horas. Los resultados obtenidos son buenos y reflejan la realidad con éxito.

**ABSTRACT:** The PENN/NCAR MM5 model has been under continuous development and testing for 25 years. This model is known as the "Community" model in the public domain, and is available in many places around the world. Just recently the Cuban Scientist are introducing the MM5 model in experimental way. The first attempt, under the NCAR scientists guidance, was to test the capabilities of the model in tropical cyclone track prediction. Hurricane Lily 48 hours range forecast was carry out in a two way nested grids. Successful results were obtained in this test.

### INTRODUCTION

The prediction of hurricanes track and intensity is a very important task for Cuba and the countries of the North Atlantic Basin.

Dynamical models are the best promise perform successful forecast even the persistency of some problems, mainly regarding lack of data in the tropical area and the understanding of physical mechanism that controlling the motion and development of tropical cyclones.

At present time a great advance have been reached, in this sense the latest models GDFL, and others, have improved the initialization procedures, the physics and the other remaining problems.

In Cuba we have available two operational models, the barotropic model (BAROTROP) Pérez Parrado et al, 1989, and the four layers baroclinic model (BARPRON), Mitrani et al, 1994. With acceptable results, see table 1.

The search of better prediction methods have lead the Cuban scientist to the use of more sophisticated models in experimental way, that is the case of the MM5 model, developed at the Pennsylvania State University, (Anthes and Warner 1978) and improved at the NCAR (Warner and Seaman 1990, Dudhia 1993).

In early 1997 an experiment was performed with the MM5 model in the Hurricane Lili track forecasting, during the Hurricane crossing by the Cuban Territory.

### EXPERIMENT CHARACTERISTICS.

The experiment characteristics were:

Time Period May 16-18

Analysis from TOGA

SST from NMC

Two nested grids

Horizontal resolution 90 km. outer grid, 30 km, inner grid

In figure 1, the real and predicted tracks are shown.

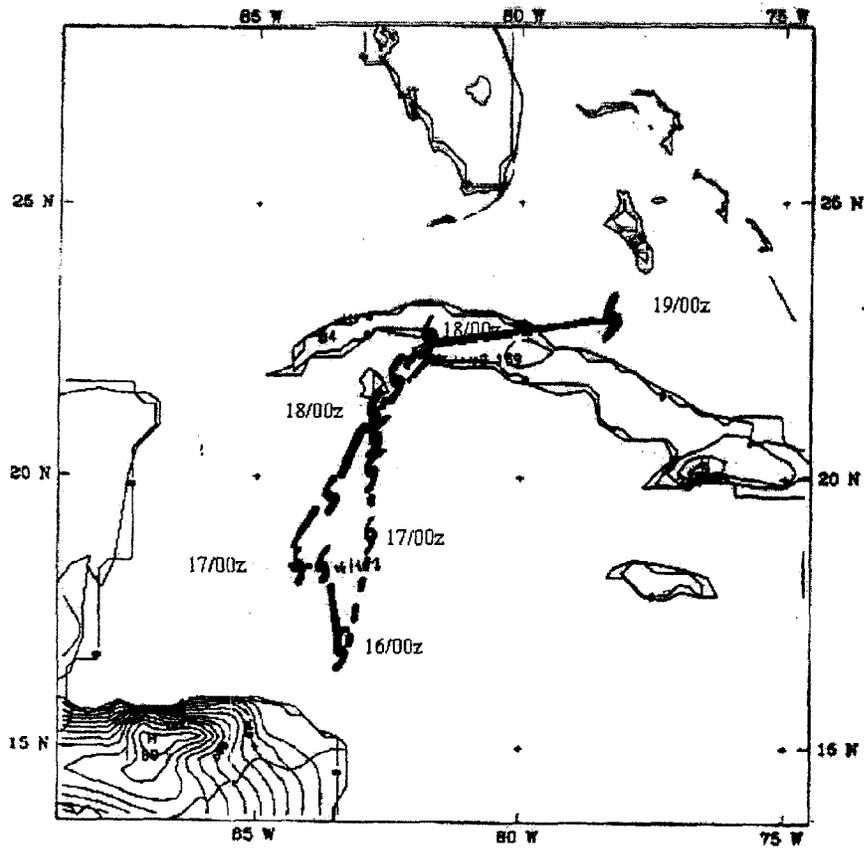


Figure 1. Real \_\_\_\_ and predicted ---- tracks for Hurricane Lily. October 16-18, 1997

The predicted track is really good, even the vortex initialization was not made.

Figure 2 Shows the predicted pressure fields every 24 hours.

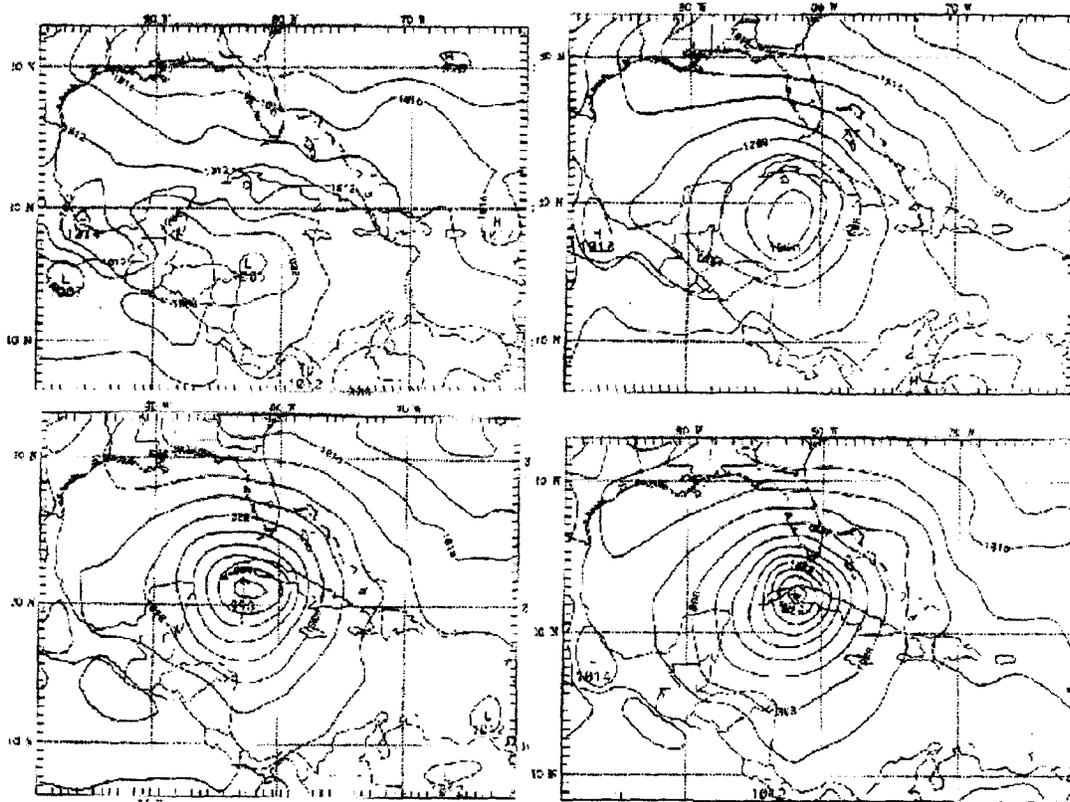


Fig 2. Pressure fields every 24 hours .From left upper chart October 16/00z to the down right October 19/00 z.

Results are very promising, even the model was not vortex inicialized.

Due to the potential of this model not only for prediction purposes but for research additional effort will be made in the future for introduce this model in operational way in Cuba.

#### REFERENCES

Anthes, R.A., Warner, T.T. (1978) : Development of hydrodynamic models suitable for air pollution and other meso-meteorological studies. *Mon. Wea.Rev.*106, 1045-1078.

Dudhia , J. (1993): A Nonhydrostatic version of the Penn State/NCAR meso-scale model. *Mon.Wea.Rev.*(in press)

Mitrani I. 1994 :Modelo Baroclínico para el Pronóstico de los campos meteorológicos con posibilidades de pronosticar la trayectoria de los ciclones tropicales. UDICT. INSMET.

Pérez Parrado R., I. Mitrani, T. Gutiérrez 1989: Pronóstico de la trayectoria de los ciclones tropicales por medio de una rejilla fina. Memorias del IV Congreso Internacional de Meteorología Tropical. Guidrometeoizdat, pp.209-214.

Warner, T.T., Seaman, N.L., 1990: A real-time meso-scale numerical weather-prediction system used for research , teaching and public service at Pennsylvania State University .*Bull. Amer.Meteor.Soc.*, **71**, 792-805.

## USE OF NUMERICAL GUIDANCE FOR TROPICAL CYCLONE FORECASTING AT THE NATIONAL HURRICANE: CURRENT STATE OF THE ART

*Richard J. Pasch  
Tropical Prediction Center/National Hurricane Center  
Miami, FL 33165*

### 1. INTRODUCTION

There have been significant advances in Numerical Weather Prediction (NWP) over the past couple of decades. Global and limited-area NWP models are invaluable tools for operational weather forecasting. At the National Hurricane Center (NHC), the state-of-the-art of tropical cyclone (TC) forecasting is intimately linked to the quality of numerical guidance available to the hurricane specialists.

Since the 1960's, the average official NHC track forecast errors have decreased at the rate of around one per cent per year (Lawrence et al. 1997). Figure 1 shows that the errors have more or less been cut in half over the past thirty years or so. These improvements are in large part attributable to better numerical guidance available to the forecasters. This guidance has advanced from simple steering concepts to high-resolution primitive equation models. A very brief description of the track forecast models currently available at the NHC, and their usage, will now be given.

### 2. TC TRACK PREDICTION MODELS AVAILABLE AT THE NHC

Numerical guidance for TC track forecasting at the NHC are of the following classes: purely statistical, statistical/dynamical, simplified steering, or purely dynamical models.

The simplest of these is the purely statistical Climatology and Persistence model, CLIPER (Neumann 1972), which serves mainly as a benchmark for forecast skill. Since the motion of a TC can be statistically related to the surrounding pressure field, the statistical/dynamical model, NHC91, makes use of deep-layer mean heights in the TC environment, both analyzed and predicted by a global model, to derive track displacements. Up until a few years ago the statistical/dynamical models, such as NHC91 or its predecessors, were usually the most reliable.

A direct application of the steering flow concept is the Beta and Advection Model or BAM (Marks 1992). Here, the predicted track of the TC follows the trajectory determined by a shallow (850-700 mb), medium (850-400 mb), or deep (850-200 mb) layer-averaged winds, plus a correction term to account for the so-called "beta drift" (Holland 1983). The wind fields are obtained from the Aviation (AVN) run of the Medium-Range Forecast (MRF) model, described below.

Until the early 1990's, statistical/dynamical and simplified steering models were the primary numerical guidance used at the NHC. Recently, however, primitive equation, i.e., dynamical, models have become the most powerful tool for TC prediction. There are several dynamical models available at the NHC. The MRF model is the National Center for Environmental Prediction's global spectral model, and it includes physical parameterizations of convective, radiative, and boundary layer processes. This model assimilates atmospheric observations from diverse sources (rawinsondes, surface observations, aircraft observations, satellite-derived data such as cloud-tracked winds, etc.) at any time of day. Every six hours, the MRF is integrated, in the AVN run, for 78 hours of forecast time. The AVN run forms the "backbone" of NHC's numerical guidance, since fields from the AVN are used to initialize most of the other TC prediction models. Aside from the AVN, two other global models are used at the NHC: the Navy's Operational Global Atmospheric Prediction System (NOGAPS) model and the United Kingdom Meteorological Office (UKMET) model. The former is a spectral model and the latter is a grid-point model. All three of these global models employ a "bogussing" system to initialize the TC circulation in the model, and can crudely represent a tropical cyclone, albeit with little or none of the inner-core structure.

A limited area barotropic model (LBAR) also provides forecasts of TC tracks. LBAR is initialized with deep-layer averaged winds and heights from a short-term AVN forecast. The LBAR track forecast is also used as input for the Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme, SHIPS.

The most sophisticated numerical model available to the NHC is the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) hurricane model. It uses a triply-nested grid centered over the TC, with an inner domain resolution of 1/6 degree, and contains parameterized cumulus convection, radiation, and boundary layer processes. A careful initialization of the TC circulation is done, and this high-resolution model is able to capture some of the inner-core features of a hurricane. More details about this model can be found in Kurihara et al. (1995). Currently, the GFDL model is, on average, the most skillful of the NHC's numerical track guidance, and it even has some skill in intensity prediction out to a couple of days. Figure 2 shows a predicted swath of surface winds generated by the GFDL model for Hurricane Erika of 1997.

### **3. USE OF NUMERICAL MODELS FOR OFFICIAL FORECASTS**

Every six hours, the NHC issues an official forecast of location, size and strength of a TC out to 72 hours. To make these forecasts, the hurricane specialist employs the array of models noted above. The procedure is still somewhat subjective in the sense that, although objective track predictions are available, human judgement remains a guiding principle. In general, the official forecast track will favor the most reliable model, typically the GFDL. Even the best models can fail in certain situations, however, and the forecaster can in many situations recognize when, for example, a certain model is performing well or another is exhibiting a bias. These considerations, along with certain non-meteorological factors (beyond the scope of this discussion), contribute to the official forecast. Usually, this forecast will lie within the envelope of tracks given by the various models. Figure 3 displays a typical suite of numerical model forecast tracks along with the official forecast. Note that the official forecast, in this case, happens to be closest to the shallow layer BAM model (BAMS).

### **4. CONCLUDING REMARKS**

Even though there have been substantial improvements in tropical cyclone track forecasting over the past several decades, there are still serious limitations, particularly in two- and three-day

forecasts, where errors of several hundred miles are not uncommon. These limitations place a serious burden on the TC warning process, making for considerable over warning and false alarm situations. Current research efforts, such as the use of ensembles to help determine the reliability of a model forecast, and increased resolution of the GFDL (which may soon be implemented operationally) hold great promise. It is hoped that continued improvements in numerical prediction of TCs in the future will lead to more precise official forecasts and warnings.

## 5. REFERENCES

Holland, G.J. (1983): Tropical cyclone motion: Environmental interaction plus a beta effect. *J. Atmos. Sci.*, **40**, 328-342.

Kurihara, Y., M.A. Bender, R.E. Tuleya, and R.J. Ross (1995): Improvements in the GFDL hurricane prediction system. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 2791-2801.

Lawrence, M.B., C.J. McAdie, and J.M. Gross (1997): Operational tropical cyclone track forecast verification at the National Hurricane Center. Preprints, *22nd Conf. On Hurricanes and Tropical Meteorology*, Ft. Collins, CO, Amer. Meteor. Soc., 475.

Marks, D.G. (1992): The beta and advection model for hurricane track forecasting. NOAA Tech. Memo. NWS NMC 70, National Meteorological Center, Camp Springs, MD, 89 pp.

Neumann, C.J. (1972): An alternate to the HURRAN (hurricane analog) tropical cyclone forecast system. NOAA Tech. Memo. NWS SR-62, 24 pp.

National Hurricane Center Atlantic Track Forecast Errors

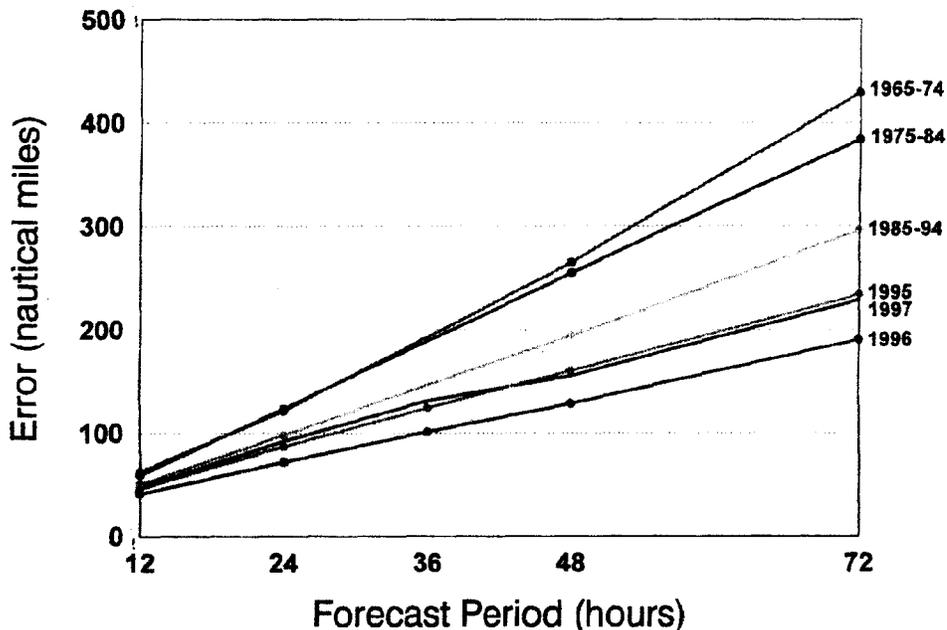


Figure 1

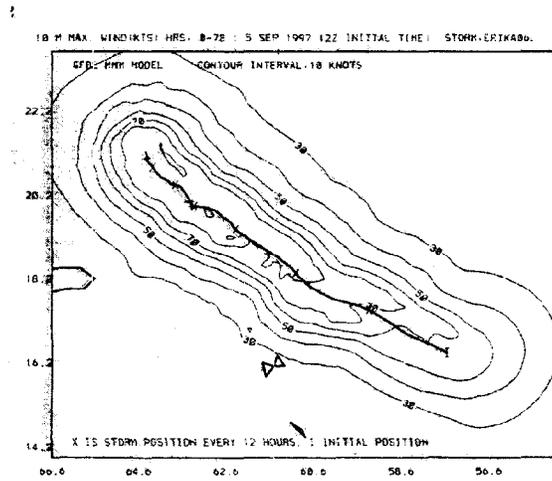


Fig.2 A predicted swath of surface winds generated by GFDL Model, Hurricane Erika,1997

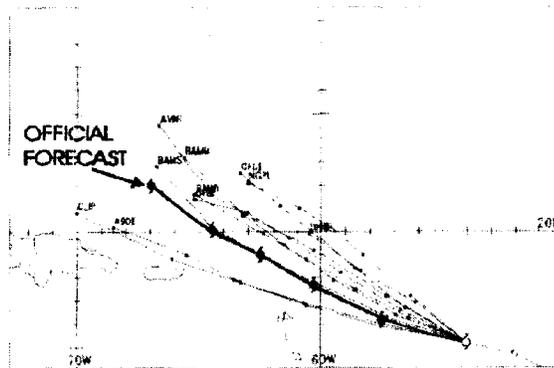


Figure 3 Typical suite of numerical model forecast tracks along with the official forecast

## **SOBRE UN MODELO CON SOLUCION DE OPERADORES DE PASO S FRACCIONADOS EN EL PRONOSTICO DEL TIEMPO DE LA REGION IV (PARTE II)**

*Enrique Buendía\* y Rafael Patiño \**

*\* Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, 04510, México, D.F., México*

**RESUMEN:** Uno de los objetivos en el pronóstico del tiempo es realizarlo con el modelo que mejor se aproxime a las condiciones reales de la atmósfera. Las soluciones de las ecuaciones primitivas por medio de diferencias finitas, series de Fourier, armónicos esféricos, elemento finito, estadísticamente y combinaciones de estos métodos han sido utilizados para alcanzar sus máximas resoluciones, a pesar de ello todavía existen diferencias entre los campos pronosticados y observados. Estas diferencias quizás han sido debidas a que los modelos no generan algunos nuevos sistemas que perturbarán el tiempo en una región determinada. En la solución de las ecuaciones de Navier-Stokes con operadores de pasos fraccionados se detecta la generación de nuevos sistemas debidos a la propia dinámica del fluido y del paso de tiempo en la integración, Nicolás et al. [6]. Por lo tanto estos métodos de solución son recomendables emplearlos en los modelos atmosféricos, para ver si se logra tener en los campos pronosticados la generación de depresiones tropicales, huracanes, tornados y otras tormentas de menor escala que hasta la fecha los modelos no detectan en su génesis. En este trabajo se realiza la integración de las ecuaciones de Navier-Stokes a 500 hPa. Sobre una atmósfera cíclica de la Región IV con fronteras de canal y una técnica de operadores de pasos fraccionados en la solución de Marchuk [5] y Skiba [7]. Los resultados son satisfactorios y superan los obtenidos por Buendía et al. [4] en el pronóstico de la trayectoria de los huracanes.

**ABSTRACT:** One of the objectives in the weather forecasting is to perform it with the model that better get closer to the real conditions of the atmosphere. The primitive equations solution by means of finite differences, Fourier series, spheric armonic, finite element, statistic and combinations of this method have been used up to reach its maxima resolutions, in spite of it, still there exist differences among the forecasting and observed fields. These differences maybe have been caused because the models do not generate new systems that will disturb the weather in a determined region. In the Navier-Stokes solution with operators of fractionated steps are detected the generation of new systems due to the own dynamic of the fluids and of the time step in the integration, Nicolás et al [6]. By the way these methods of solution are recommendable to use in the atmospheric models, to observe if one can get in the forecasting fields the tropical depressions, hurricanes, twisters and other storms of minor scale generation that up to date the models do not detect in their origin. At this work it is made the integration of the Navier-Stokes equations for 500 hPa. On a cyclic atmosphere of the Fourth Area with boundaries of channel and a technic of fractioned steps operators in the Marchuk solution [5] and Skiba [7]. The results are satisfactory and surpass the obtained by Buendía et al. [4] in the forecasting of the hurricane trajectories.

### **INTRODUCCION.**

El pronóstico numérico del estado de tiempo atmosférico en México es de vital importancia para desarrollar las actividades humanas. En general, la prevención toma su principal relevancia durante el período comprendido entre los meses de mayo a noviembre que es cuando se presentan depresiones y tormentas tropicales, así como huracanes en esta región.

Estos fenómenos amenazan nuestro país tanto por el Océano Atlántico como por el Pacífico, por lo que es de vital importancia mejorar los pronósticos de los modelos reportados por Buendía et al. [1], [2] [3] con objeto de que la solución se aproxime cada día más a la dinámica de la naturaleza.

Con el fin de lograr el objetivo, en este artículo se propone la solución de las ecuaciones primitivas por medio de operadores de pasos fraccionados en una área limitada, siendo ésta la Región Meteorológica IV ampliada 2,000 Km. al oriente para crear condiciones atmosféricas cíclicas y 2,000 Km. al Norte para disminuir el efecto de las condiciones de frontera donde se considera que la altura geopotencial a 500 hPa mantiene constante. En la frontera Sur no existe tanta necesidad de crear esta ampliación, debido a que la condición de frontera manifestada se aproxima mucho con la realidad.

Este modelo se integra sobre una proyección cónica de Lambert de la Región meteorológica IV que comprende a Canadá, Estados Unidos de Norteamérica, México, Centro América, el Caribe, Norte de América del Sur y el Océano Pacífico Oriental con una malla de 76 x 88 puntos reticulares separados 108 Km.

## EL MODELO

Las ecuaciones primitivas se sabe que están dadas por:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv &= -g \frac{\partial h}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} - fv &= -g \frac{\partial h}{\partial y} \\ \frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x}(uH) + \frac{\partial}{\partial y}(vH) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

donde 'u' y 'v' representan la rapidez zonal y meridional de la velocidad horizontal, 'f' es el parámetro de Coriolis ( $f=2\Omega \text{ Sen } \varphi$ ), g es la aceleración de la gravedad, h es la altura geopotencial de la atmósfera libre y  $H = h - h_m$  con  $h_m$  la altura orográfica,  $\Omega$  la velocidad angular de la tierra,  $\varphi$  la latitud. Se denota por  $\Delta x$  la variación de los fluidos de la distancia horizontal Oeste-Este y por  $\Delta y$  el incremento de la distancia horizontal Sur-Norte.

Las condiciones de frontera del canal para este modelo se manifiestan como:

$$U(j, y, t) = U(j + 1, y, t) \quad \text{Para } j = 1$$

$$V(j, y, t) = -V(j + 1, y, t) \quad e$$

$$h(j, y, t) = h(j + 1, y, t) \quad j = 75$$

Para proporcionar la solución del sistema de ecuaciones (1) por medio de pasos fraccionados se definen a las siguientes variables:

$$z = \sqrt{H} \quad U = zu \quad V = zv \quad (2)$$

De tal forma que al substituirse las expresiones dadas por (2) en las proporciones por (1), estas últimas toman la forma, Skiba [7]:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (uU) + u \frac{\partial U}{\partial x} \right] + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (vU) + v \frac{\partial U}{\partial y} \right] - fV &= -gz \frac{\partial h}{\partial x} \\
\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (uV) + u \frac{\partial V}{\partial x} \right] + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial y} (vV) + v \frac{\partial V}{\partial y} \right] - fU &= -gz \frac{\partial h}{\partial x} \\
\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (zU) + \frac{\partial}{\partial y} (zV) &= 0
\end{aligned} \tag{3}$$

Al fraccionar las ecuaciones (3) a dos ecuaciones unidireccionales en forma similar a la dada por Marchuk [5] en la dirección zonal la ecuación de movimiento se reduce a:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (uU) + u \frac{\partial U}{\partial x} \right] - \frac{1}{2} fV = -gz \frac{\partial h}{\partial x} \tag{4}$$

y la contribución de la ecuación de movimiento meridional se transforma a:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (uV) + u \frac{\partial V}{\partial x} \right] - \frac{1}{2} fU = 0 \tag{5}$$

Finalmente, la contribución zonal de la ecuación de continuidad es:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (zU) = 0 \tag{6}$$

Para la dirección meridional las ecuaciones de Navier-Stokes y la ecuación de continuidad para una atmósfera libre de fricción toman la forma:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial y} - (vU) + v \frac{\partial V}{\partial y} \right] - \frac{1}{2} fV = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[ \frac{\partial}{\partial y} - (vV) + u \frac{\partial V}{\partial y} \right] - \frac{1}{2} fU = -gz \frac{\partial h}{\partial y} \quad (8)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} - (zV) = 0 \quad (9)$$

En diferencias finitas las ecuaciones (4, 5 y 6) para el j-esimo renglón se representan como:

$$\frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left[ \frac{\bar{u}_{i+1} U - \bar{u}_{i-1} U_{i-1}}{2\Delta x} \right] + \bar{u}_i \left( \frac{U_{i+1} - U_{i-1}}{2\Delta x} \right) - \frac{1}{2} f_i V_i = -gz \frac{h_{i+1} - h_{i-1}}{2\Delta x} \quad (10)$$

$$\frac{V_i^{n+1} - V_i^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left[ \frac{\bar{u}_{i+1} V - \bar{u}_{i-1} V_{i-1}}{2\Delta x} \right] + \bar{u}_i \left( \frac{V_{i+1} - V_{i-1}}{2\Delta x} \right) - \frac{1}{2} f_i U_i = 0 \quad (11)$$

$$\frac{H_i^{n+1} - H_i^n}{\Delta t} + \frac{\bar{z}_{i+1} V - \bar{z}_{i-1} V_{i-1}}{2\Delta x} = 0 \quad (12)$$

Para la i-esima columna las ecuaciones (7), (8) y (9) se manifiestan como:

$$\frac{U_j^{n+1} - U_j^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left[ \frac{\bar{v}_{j+1} U - \bar{v}_{j-1} U_{j-1}}{2\Delta y} + \bar{v}_j \frac{U_{j+1} - U_{j-1}}{2\Delta y} \right] - \frac{1}{2} f_j V_j = 0 \quad (13)$$

$$\frac{V_j^{n+1} - V_j^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left[ \frac{\bar{v}_{j+1} V - \bar{v}_{j-1} V_{j-1}}{2\Delta y} + \bar{v}_j \frac{U_{j+1} - U_{j-1}}{2\Delta y} \right] + \frac{1}{2} f_j V_j = -gz_j \frac{h_{j+1} - h_{j-1}}{2\Delta y} \quad (14)$$

$$\frac{H_j^{n+1} - H_j^n}{\Delta t} + \frac{\bar{z}_{j+1}V - \bar{z}_{j-1}V_{j-1}}{2\Delta y} = 0 \quad (15)$$

Si para cualesquier variable se substituye la propiedad:  $W_{ji} = \begin{pmatrix} W_{ji}^n + W_{ji}^{n+1} \\ 2 \end{pmatrix}$  para resolver el sistema (10, 11, 12, 13, 14 y 15) implícitamente, para el caso lineal con:

$$\bar{z}_{ji} = z_{ji}^n, \bar{u}_{ji} = u_{ji}^n, \bar{v}_{ji} = v_{ji}^n, \text{ se tiene}$$

$$\begin{aligned} U_{ji}^{t+1} &= U_{ji}^t - A_{ji}U_{ji+1}^{t+1} - B_{ji}U_{ji-1}^{t+1} + co_{ji}V_{ji}^{t+1} - C_{ji}(H_{ji+1}^{t+1} - H_{ji-1}^{t+1}) \\ V_{ji}^{t+1} &= V_{ji}^t - A_{ji}V_{ji+1}^{t+1} - B_{ji}V_{ji-1}^{t+1} + co_{ji}U_{ji}^{t+1} \\ H_{ji}^{t+1} &= H_{ji}^t - F_{ji}U_{ji+1}^{t+1} + G_{ji}U_{ji-1}^{t+1} \end{aligned} \quad (16)$$

donde:

$$\begin{aligned} A_{ji} &= \frac{\Delta t(u_{ji+1}^t + u_{ji}^t)m_{ji}}{8\Delta x} & F_{ji} &= \frac{\Delta t z_{ji+1}^t m_{ji}}{4\Delta x} \\ B_{ji} &= \frac{-\Delta t(u_{ji-1}^t + u_{ji}^t)m_{ji}}{8\Delta x} & C_{ji} &= \frac{\Delta t g_{ji} z_{ji+1}^t m_{ji}}{4\Delta x} \\ co &= \frac{f_{ji} \Delta t}{4} & G_{ji} &= \frac{\Delta t z_{ji-1}^t m_{ji}}{4\Delta x} \end{aligned}$$

Después de resolver por relajación el conjunto de ecuaciones anterior, los valores pronosticados  $U^{t+1}$ ,  $V^{t+1}$  y  $H^{t+1}$  son utilizados como  $U^t$ ,  $V^t$  y  $H^t$  en el siguiente esquema de ecuaciones que representan la segunda parte de la partición matemática analizada en este artículo de las ecuaciones primitivas:

$$\begin{aligned} U_{ji}^{t+1} &= U_{ji}^t - D_{ji}U_{ji+1}^{t+1} - E_{ji}U_{ji-1}^{t+1} + co_{ji}V_{ji}^{t+1} \\ V_{ji}^{t+1} &= V_{ji}^t - A_{2ji}V_{ji+1}^{t+1} + B_{2ji}V_{ji-1}^{t+1} + co_{ji}U_{ji}^{t+1} + C_{ji}(H_{j-\bar{u}}^{t+1} - H_{j-\bar{u}}^t) \\ H_{ji}^{t+1} &= H_{ji}^t - C_{2ji}V_{ji+1}^{t+1} - D_{2ji}V_{ji-1}^{t+1} \end{aligned} \quad (17)$$

Donde:

$$D_{ji} = \frac{\Delta t(v'_{j+li} + v'_{ji})m_{ji}}{8\Delta x} \quad B_{2ji} = \frac{\Delta t(v'_{j+1} - v'_{j-li})m_{ji}}{4\Delta x}$$

$$E_{ji} = \frac{\Delta t(-v'_{j-1l} - v'_{ji})m_{ji}}{8\Delta x} \quad C_{2ji} = \frac{\Delta tz'_{j+li}m_{ji}}{4\Delta x}$$

$$A_{2ji} = \frac{\Delta t(v'_{j+li} + v'_{ji})m_{ji}}{4} \quad D_{2ji} = \frac{\Delta tz'_{j-li}m_{ji}}{4\Delta x}$$

Después de resolver el conjunto de ecuaciones anterior se complementa un paso de tiempo  $t + 1$  y se procede a resolver nuevamente el conjunto de ecuaciones (16) y (17) para evaluar la parte de  $U^{t+2}$ ,  $V^{t+2}$  y  $H^{t+2}$

## RESULTADOS.

Las condiciones iniciales que se emplearán para resolver alternadamente los dos conjuntos de ecuaciones resultantes serán los datos de las 12:00 UTC de los días en que los huracanes Andrés, Nora, Olaf y Paulina afectaron al territorio de la República Mexicana. Por las condiciones atmosféricas que prevalecieron en el año de 1997, se harán referencias de algunas observaciones que se tienen de los ciclones que se originan en la cuarta región cuando la corriente de El niño esta presente.

El paso de tiempo es de diez minutos y la resolución del modelo se hace sobre una malla de 37x82 puntos reticulares separados 108 km. que simula a una región cuarta cíclica, a la cual se le agregaron cinco columnas al Este para crear la ciclicidad requerida por el modelo y que previamente Buendía et al (1984, 1993) han demostrado que esta hipótesis genera condiciones favorables para realizar pronóstico de la trayectoria de los huracanes en un área limitada por permitir el movimiento de los vientos del Este y del Oeste, ya que el uso de esta condición afecta en menor grado los campos sinópticos dentro de la zona de integración que el considerar fronteras rígidas. Los efectos de frontera al considerar que la altura geopotencial se mantiene constante en las fronteras Norte y Sur, para el caso del Norte se disminuyen considerándose al límite del área de integración cinco renglones al norte de la región cuarta. En el caso de la frontera Sur hasta el momento se ha conservado el límite geográfico de la región IV por aproximarse a las condiciones reales de la atmósfera pero se ha visto la necesidad de desplazarla hacia más hacia el Sur, porque su influencia en el pronóstico es bastante fuerte cuando los huracanes están próximos a ella.

Desde los meses de Enero y Febrero del año de 1997 se empezó a detectar un incremento en la temperatura superficial del océano Pacífico oriental ecuatorial, llegando a registrarse una anomalía de  $1^{\circ}\text{C}$  durante el mes de Abril, tal y como se muestra en la figura 1. Es notorio que este incremento de la temperatura esta acompañado también con anomalías positivas sobre las costas occidentales de Estados Unidos de Norteamérica, Canadá y Alaska, así como en las costas norte y noreste de la antigua Unión Soviética. Conforme fue transcurriendo el tiempo, esta anomalía en la temperatura estuvo aumentando de tal forma que en el mes de mayo el Centro de Predicción del Clima de la NOAA oficialmente declaró la presencia del fenómeno de El niño en nuestro planeta.

Durante los meses de Mayo-Julio la anomalía de la temperatura superficial del océano pacífico oriental alcanzó los  $3^{\circ}\text{C}$  desde aproximadamente  $165^{\circ}\text{W}$  hasta las costas de Chile, Perú, Ecuador y Colombia, tal y como se muestra en la figura 2. Es notorio también la existencia de un incremento en la anomalía de la temperatura similar en las costas antes mencionadas; particularmente en las costas occidentales de la Península de Baja California Norte, donde Willet (1960) reportó una anomalía de la temperatura superficial del océano pacífico oriental californiano similar a la zona ecuatorial durante el fenómeno de El niño de 1957-58. Este hecho se registró en esta zona en el transcurso de El niño de 1997-98, hasta el mes de Enero de 1998 donde el paso continuo de frentes fríos, disminuyó la anomalía de temperatura en tres grados centígrados no obstante el área oceánica de California se mantiene por arriba de lo normal con una anomalía positiva de  $3^{\circ}\text{C}$  hasta el mes de marzo en que se escribe este artículo.

En el transcurso de la última semana del mes de Julio al mes de Agosto se detectó un aumento en la anomalía de la temperatura superficial del océano Pacífico ecuatorial alcanzando los  $6^{\circ}\text{C}$ , temperatura máxima que se ha mantenido hasta el mes de Marzo de 1998 frente a las costas del Perú principalmente. En el mes de diciembre de 1997 empezó a disminuir paulatinamente el área que comprendía esta anomalía por lo que el Centro de Predicción del Clima manifestó la probable culminación de este fenómeno, tal y como se muestra en la figura 3.

Cuando el fenómeno del niño está presente disminuye considerablemente la generación de Huracanes y tormentas tropicales en el océano Atlántico, mientras que en el océano Pacífico los ciclones con nombre que se generan están por arriba de lo normal (14), tal y como se muestra en la figura 4 donde se aprecian las trayectorias que tuvieron las tormentas tropicales y huracanes durante los fenómenos de El niño de 1987-88, 1992-93 y 1997-98. También se ha observado que algunos de éstos son bastante intensos alcanzando las categorías cuatro y cinco de acuerdo a la clasificación de Shaffir-Simons. En la temporada de huracanes de 1997 se tuvieron los casos de Paulina y Linda respectivamente.

Gray (1968), entre otros científicos ha manifestado que la temperatura superficial del océano requerida para que existan condiciones ideales en la generación y propagación de tormentas tropicales y huracanes es mayor o igual a  $28^{\circ}\text{C}$ . En la temporada de huracanes de 1997, se puede apreciar en las figuras 2, 3, y 4 la existencia de una anomalía positiva de hasta  $3^{\circ}\text{C}$  sobre el océano Pacífico nacional, favoreciéndose así la generación de tormentas tropicales y huracanes en el área. De los huracanes que afectaron las costas de México se encuentran principalmente a Andrés, Nora, Olaf, Paulina y Ricky.

Serra y Buendía (1968) manifestaron la tendencia que tienen los huracanes de desplazarse sobre las áreas de mayor temperatura oceánica para alimentarse y mantener su circulación, en forma notoria este hecho se observó con el huracán Nora, fenómeno que se desplazó paralelo a las costas occidentales de la República Mexicana hasta que estuvo en la vecindad de un núcleo de anomalía de  $6^{\circ}\text{C}$  frente a las costas de la Península de Baja California del cual absorbió una considerable cantidad de energía por evaporación del océano disminuyendo la temperatura en esta región aproximadamente  $3^{\circ}\text{C}$  tal y como se muestra en la figura 5, donde antes de que el huracán Nora incursionara en la zona se detecta una anomalía de la temperatura de aproximadamente  $6^{\circ}\text{C}$  y después del paso de este fenómeno se aprecia la anomalía de  $3^{\circ}\text{C}$ . Este ciclón penetró a la República Mexicana afectando amplias zonas de Baja California Norte donde la orografía disminuyó su intensidad y a su paso por el mar de Cortés, Sonora Mex. y Arizona USA se presentó como tormenta, depresión y perturbación, tal y como se muestra por la trayectoria observada y pronosticada por el modelo del CCA de

Buendía et al (1988,1993), por las diferencias que existen entre la trayectoria observada y la pronosticada se concluye que la predicción fue satisfactoria.

En la figura 6, se puede apreciar como el área comprendida por las trayectorias de los huracanes Nora, Olaf y Paulina paralela a la costa occidental de la República Mexicana reporta como hecho sobresaliente una disminución en la temperatura superficial del océano, lo cual nuevamente se comprueba que estos fenómenos absorben gran cantidad de energía del mar, en el transcurso de este período la anomalía varió de  $3^{\circ}\text{C}$  a  $-1^{\circ}\text{C}$ , considerándose las condiciones de antes del nacimiento de Nora y después del paso del huracán Paulina.

El huracán Paulina se reportó a las 12:00 UTC del día de Septiembre como depresión tropical al sur-oeste del Golfo de Tehuantepec, ligado a una corriente de chorro que acompaña a un frente frío por lo cual su tendencia de desplazamiento inicial fue con una gran componente del Este de acuerdo al desplazamiento del sistema al que estaba ligado, detectándose el día a las 12:00 UTC al sur de la parte central del Golfo de Tehuantepec ya con intensidad de tormenta tropical; durante las siguientes veinticuatro horas la tormenta tropical Paulina siguió desplazándose con componente Este de tal forma que para el día de Septiembre a las 12:00 UTC se encontraba al Sureste de este golfo incrementándose su intensidad a huracán por lo cual también aumento el efecto de Coriolis y el fenómeno empezó a independizarse paulatinamente de la corriente al que estaba asociado, manteniéndose por un período casi estacionario y después empezó a desplazarse hacia el oeste, noroeste y oeste-noroeste penetrando a la República Mexicana aproximadamente al oeste del puerto de Huatulco desplazándose ligeramente en el interior de la costa hasta el puerto de Acapulco donde al hacer presencia causo grandes pérdidas humanas y materiales a pesar de que ya se encontraba debilitado por la constante interacción que tuvo con la orografía de los estados de Oaxaca y Guerrero. En la vecindad de este puerto penetró más al continente y sus restos se desplazaron a lo largo los estados de Michoacán, Jalisco y Aguascalientes, tal y como se muestra en la figura 7. En esta figura la línea continua representa la trayectoria observada del huracán Paulina y las líneas discontinua y punteada representan la trayectoria pronosticada por el modelo del CCA los días y respectivamente. Es notorio que el pronóstico del día fue satisfactorio hasta 36 hrs. ya que después el modelo desplazó al huracán al interior del Golfo de Tehuantepec cercano a Salina Cruz, Oaxaca, error que fue enmendado en el siguiente pronóstico donde se reportó adecuadamente la trayectoria destructiva que tuvo lamentablemente el fenómeno.

En un momento dado se llegó a pensar que el huracán Paulina tendría una trayectoria similar a la reportada por el primer huracán de la temporada Andrés (figura 7), con la diferencia de que este ciclón inicialmente se desplazó con una considerable componente del oeste del día al día , en esta fecha interaccionó con una corriente en chorro asociada a un frente frío y debido a la intensidad de este sistema el ciclón Andrés fue capturado por él, manteniéndose por un período breve casi estacionario y después se desplazó hacia el Este como parte extrema de la corriente, de tal forma que para el día se localizaba a las 12:00 UTC sobre el golfo de Tehuantepec continuando su desplazamiento con una gran componente del Este hasta que penetró a continente en tierras Salvadoreñas y terminando así su existencia.

Los resultados del modelo reflejan que cuando un ciclón esta asociado a una corriente de chorro, el momento en que empiezan a interactuar o el instante en que la interacción se termina no es detectada por el modelo tal y como se aprecia con las trayectorias pronosticadas del ciclón Andrés antes de interactuar con la corriente en chorro el día de junio y el huracán Paulina antes de independizarse de la corriente el día de septiembre. Tomándose como punto de comparación estos dos fenómenos se concluye que solo cuando la intensidad

del huracán es de al menos cuarto nivel, es posible que el huracán se independice de la corriente en caso contrario su trayectoria estará asociada al desplazamiento de la corriente.

## 5.- BIBLIOGRAFIA'

- 1.- Buendía E. C., Villicaña C. F., Delgado D. O. y D. E. (1988):- Step Boundary Conditions in the Barotropic Model. *Mausam*, 3, 295-300
- 2.- Buendía E. C., Villicaña C. F., Delgado D. O., Del Valle S. E., Gómez A. F. (1990):- El pronóstico del Huracán Gilberto. *Geofísica I.P.G.H.*, 33, 127-14
- 3.- Buendía E.C., Villicaña C.F., Delgado D. O., Del Valle S.E., Gómez A. F.- (1992): On the Tajejectory Cyclons Likely to Affect the Mexican Republic. *Atmósfera* 5, 21-30
- 4.- Buendía E.C., Villicaña C.F., Azpra R.E. (1995): Hurricane trajectory Forecast, 21st. Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology. American meteorology Society pp. 318-319
- 5.- Marchuk, G.I.- (1982): *Methods of Numerical Mathematics*, springer-Verlag, New York
- 6.- Nicolas C.A., Sánchez J.F., Bermúdez B. y Buendía C. E. (1995): -Operator Spliting and Upwind Equation Proceedings of the Ninth International Conference Finite Elements in Fluid. *New Trends and Aplications IACM Spetial Interest Conference* pp. 337-346
- 7.- Skiba Y. N- (1995): The Total Energy-Finite Difference Scheme for the Primitive Equation Barotropic Atmosphere Model. Personal Communication

## AGRADECIMIENTOS.

A Edith Noemi Díaz Cid por la ayuda en la mecanografía, Alfonso Salas Cruz por la ayuda computacional en los algoritmos, Javier Villicaña Cruz y Enrique Azpra Romero por su trabajo técnico en este artículo.

## **MODELO NUMERICO PARA PRONOSTICAR LA SURGENCIA QUE PROVOCAN LOS HURACANES EN LAS COSTAS DE CUBA**

*Omar García Concepción y Rafael Pérez Parrado  
Instituto de Meteorología, Cuba  
e-mail dinamica@met2.met.inf.cu*

**RESUMEN:** En el presente trabajo se desarrolla un modelo dinámico para pronosticar la surgencia provocada por los huracanes sobre la línea costera y los mares cercanos que rodean a Cuba. Una forma linealizada de las ecuaciones de transporte es usada para calcular la surgencia sobre una rejilla rectangular de 30 x 30 puntos, con un paso espacial de 11,1 km. La tormenta puede moverse en cualquier dirección y velocidad con relación a la línea costera. En este modelo se incorpora la batimetría real de los alrededores de Cuba. Algunos resultados son presentados.

**ABSTRACT:** In the present work a bidimensional numerical dynamic model was developed for forecasting of hurricane storm surges on Cuba's insular shelve and coastlines. A linearized form of the transport equations is used to compute surge in a rectangular grid of (30 x 30) points and space step of 11,1 km. The storm move in any fixed direction and speed relative to line coast. The model has incorporated the actual bathymetric data around Cuba. Some results are presented.

### **1. INTRODUCCION**

Entre los elementos adversos del tiempo asociados los ciclones tropicales se encuentran: los vientos con fuerza de huracán (vientos superiores a los 117 km/h), las inundaciones debido a las intensas lluvias, las marejadas y la surgencia, precisamente, para muchos meteorólogos es la surgencia el más destructivo de ellos, como promedio tiene asociada nueve de cada diez víctimas y el 90 % de los daños materiales que ocurre debido a la afectación de un huracán.

Definiéndola en su forma más simple, la surgencia es la elevación anormal y temporal del nivel debido al desplazamiento al desplazamiento de un ciclón tropical sobre la plataforma continental o insular. Como promedio afecta unos 160 km. de la línea costera durante unas seis horas, generalmente el máximo absoluto se presenta a la derecha del punto de llegada a tierra del organismo tropical, próximo al radio de viento máximo.

El archipiélago cubano ha sido afectado en diferentes ocasiones por intensos huracanes que han ocasionado impresionantes surgencias, entre estas se destaca la ocurrida en la costa sur de la provincia de Camagüey en noviembre de 1932, barrió completamente con el pueblo de Santa Cruz del Sur con el triste saldo de más de 2500 muertes, considerándose el mayor desastre natural que ha sufrido Cuba.

La finalidad del presente trabajo es obtener un modelo dinámico mejorado para el pronóstico de la surgencia que pueden ocasionar los ciclones tropicales sobre la plataforma insular y las costas de Cuba. Para lograr este objetivo se estudiaron las características y el comportamiento presentado por el modelo cuyas siglas son MONSAC1 (García y Pérez Parrado, 1994) y se tomaron en consideración las condiciones objetivas con que se cuenta en el país, esto es: base geográfica de datos, tipo de computadoras personales disponibles, registros históricos, etc.

## 2. METODOLOGIA EMPLEADA Y RESULTADOS

Aunque se realizaron diferentes pruebas con el esquema de rejilla "B" de Mesinger y Arakawa (1976) para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales que describe la altura de la surgencia y el movimiento del fluido, finalmente se decidió mantener la filosofía utilizada en el MONSAC1, tampoco se varió el algoritmo utilizado para el cálculo de los diferentes coeficientes del modelo, ni las parametrizaciones utilizadas para el cálculo de las tensiones superficiales y de fondo.

El sistema de ecuaciones utilizado fue la forma linealizada de las ecuaciones de transporte de masa planteada por Harris y Jelesnianski (1964) y Jelesnianski (1966), el cual se presenta a continuación:

$$\begin{aligned} \frac{\delta u}{\delta t} &= -g D_{(x,y)} \frac{\delta h}{\delta x} + f v + \frac{D_{(x,y)}}{\rho} \frac{\delta p}{\delta x} \\ &+ \frac{\tau_s^{(x)}(x, y, t)}{\rho} + \frac{\tau_F^{(x)}(x, y, t)}{\rho} \\ \frac{\delta v}{\delta t} &= -g D_{(x,y)} \frac{\delta h}{\delta y} - f u + \frac{D_{(x,y)}}{\rho} \frac{\delta p}{\delta y} \\ &+ \frac{\tau_s^{(y)}(x, y, t)}{\rho} + \frac{\tau_F^{(y)}(x, y, t)}{\rho} \\ \frac{\delta h}{\delta t} &= -\frac{\delta u}{\delta x} - \frac{\delta v}{\delta y} \end{aligned}$$

Donde:

- u, v      transporte en las direcciones x, y respectivamente
- g          aceleración de la gravedad
- $D_{(x,y)}$     profundidad del fluido no perturbado
- h          altura de la surgencia (en metros), por encima del nivel medio del mar
- f          parámetro de Coriolis
- D          densidad del agua de mar
- P          presión atmosférica
- $\tau_s^{(x)} \tau_s^{(y)}$     componentes de la tensión de superficie
- $\tau_F^{(x)} \tau_F^{(y)}$     componentes de la tensión de fondo

De importancia vital al diseñar un modelo dinámico para calcular la surgencia es la representación de las “fuerzas conductoras” del fenómeno, o sea el campo de viento y de presión alrededor del ciclón tropical. En este trabajo estos campos se representan de igual forma que en el MONSAC1 (García y Pérez Parrado, 1994). En la “ Fig. 1” se comparan los perfiles del viento real y el estimado por el modelo para el huracán Emily de 1993.

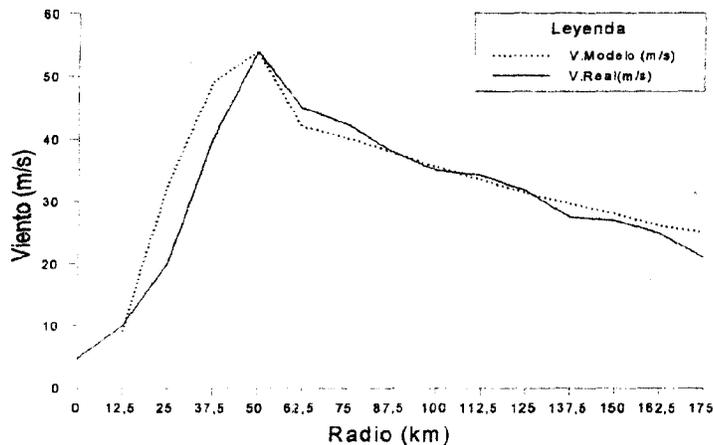


Figura 1 Comparación entre el perfil real del viento (tomado de Avila, 1993) y el modelado para el huracán Emily (31 de agosto de 1993).

Un gran número de investigadores han señalado el importante papel que desempeña la batimetría de un lugar en la amplificación de la surgencia, cuando un huracán se desplaza sobre aguas poco profundas, de lo anterior se deriva que el cálculo de la surgencia mediante un modelo donde se considera una batimetría ficticia, indudablemente ya tiene una limitante al calcular los rasgos del campo de la surgencia. Por esta razón se obtuvo una base batimétrica para los alrededores de Cuba, la cual consiste de 9800 datos batimétricos distribuidos de manera uniforme en una rejilla rectangular con 11 km de paso espacial.

Al analizar las características físico-geográficas de la plataforma insular de Cuba, se construyeron nueve cuencas, “ Fig. 2”. El número de cada cuenca es un parámetro de entrada al modelo, usado en el algoritmo computacional como parámetro de control para situar el centro del ciclón tropical y para controlar las transformación en coordenadas de rejilla de las coordenadas geográficas.

Al efectuar diferentes corridas, una vez sustituido el fondo ficticio utilizado en el modelo MONSAC1 por el real, fue necesario implantar nuevas condiciones de frontera, para evitar la ocurrencia de la inestabilidad computacional que se presentaba.

Por tal motivo se implantaron las condiciones de frontera propuestas por Jelesnianski, Chen y Shaffer (1992) entre aguas poco profunda, mediana y profunda .

Aguas profundas (mayor a 45 metros)

$$h_{i,j} = (h_0)_{i,j}$$

Medianamente profundas (mayor que 23 metros y menor de 45 metros)

$$\left( \frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y} \right)_{i,j} = \left( \frac{\partial h_0}{\partial x}, \frac{\partial h_0}{\partial y} \right)_{i,j}$$

Aguas poco profundas (menores de 23 metros)

$$\left( (D) \frac{\partial h}{\partial x}, \frac{\partial h}{\partial y} \right)_{i,j} = \left( (D) \frac{\partial h_0}{\partial x}, \frac{\partial h_0}{\partial y} \right)_{i-1,j}$$

donde  $h_0$  es la altura hidrostática

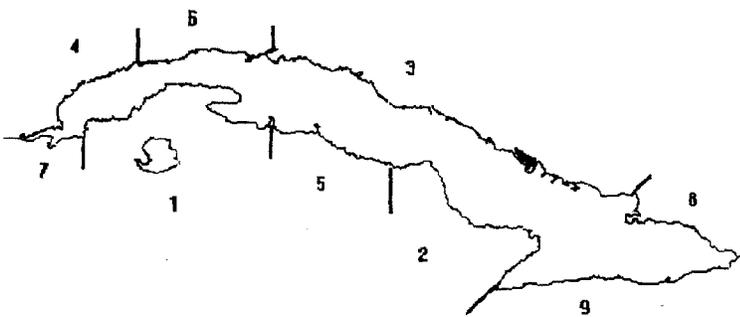


Figura 2 Cuencas seleccionadas para el modelo de surgencia. La numeración es en orden de importancia de acuerdo a las características físico geográficas de la plataforma insular en la generación de la surgencia . (la cuenca más importante es la 1, disminuyendo consecutivamente su importancia).

En el Primer Taller Internacional sobre Ciclones Tropicales (IWTC-I) celebrado en Bangkok, 1985, Jelesnianski (citado en WMO, 1993) resumió los problemas relacionados con el monitoreo de los eventos de surgencia de la siguiente manera:

- (a) Las observaciones son deficientes, casuales y sujetas a cambios
- (b) Los mareógrafos son pocos y situados muy lejos uno de otro y frecuentemente no funcionan bien. Un problema reconocido en la calibración y verificación de los modelos numéricos de surgencia es la falta de archivos de datos de este evento

En Cuba los registros históricos sobre estos eventos son muy aisladas. Las pocas observaciones están relacionadas con las marcas dejadas por el nivel de las aguas y las líneas dejadas por los restos de desperdicios, método ampliamente usado, pero en nuestro caso se conoce poco sobre la forma en que fueron realizadas, siendo lo más probable que no se siguiera una metodología totalmente acorde con lo sugerido por la Organización Meteorológica Mundial. (WMO, 1978).

De lo expresado en el párrafo anterior se deriva la imposibilidad de poder realizar una evaluación detallada sobre la habilidad del modelo, por no contar con una muestra histórica que permita comparar los valores de la altura del nivel de las aguas dados por el modelo de surgencia y los valores reales. No obstante, en la "Fig. 3" se presenta una comparación entre los resultados del modelo y los registros históricos disponibles del huracán de octubre de 1944.

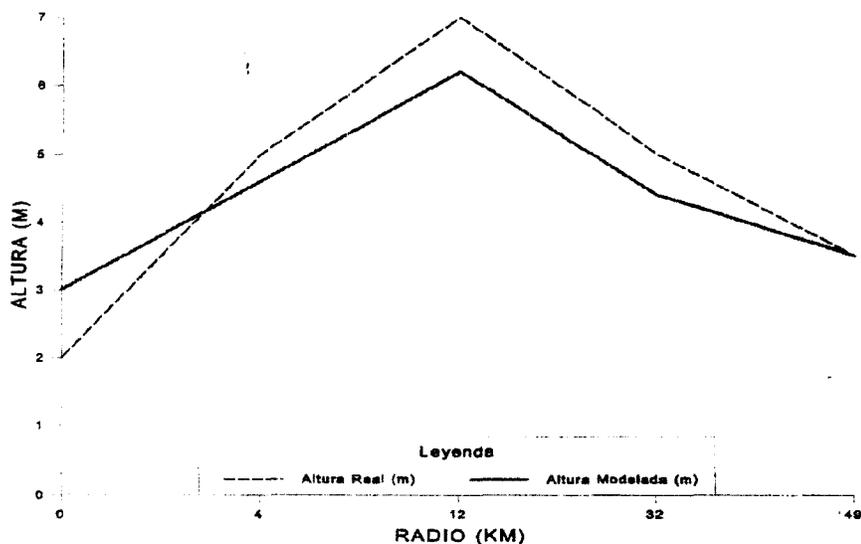


Figura 3 Gráfico de la altura alcanzada por la marea de tormenta durante el huracán de octubre de 1944, de acuerdo a testigos presenciales y el perfil de la surgencia dado por el modelo.

Un requisito previo para confeccionar los planes de evacuación es la determinación de las áreas costeras propensas a inundaciones debido a la surgencia. La inundación potencial podría ser especificada a través del estudio de eventos pasados ocurridos en la región de interés, pero los huracanes son eventos de rara ocurrencia para muchas regiones del mundo, en consecuencia, muchos de los datos hidrometeorológicos no están disponibles para este fin.

Entre las utilidades que brindan los modelos numéricos está la compensación de esa falta de datos. Un producto de gran utilidad en ese aspecto es el EOHW (Jarvinen y Gebert, 1986).

El EOHW representa el valor máximo de la altura alcanzada por la surgencia para cada punto de la rejilla (independiente del tiempo) y brinda una información sobre el comportamiento que tendrá la altura de la surgencia en un escenario dado para distintos ciclones tropicales. Al construir los mapas de EOHW para una cuenca dada es necesario tomar en consideración la climatología de los ciclones que han afectado esa zona.

En este trabajo se obtiene el EOHW para las costas cubanas, construido de la siguiente manera:

Para cada cuenca se corrieron huracanes en las direcciones más probables de afectación (desde un punto de vista climatológico), estas son: S, SE y SW en la costa sur y E y NE en la costa norte.

Como presión central mínima y viento máximo sostenido se consideró el valor medio para cada intervalo de la escala de intensidad de Saffir / Simpson, (citada por Rappaport y Mc Adie, 1991), el radio de viento máximo fue tomado como 20 km y la velocidad de traslación del ciclón 20 km/h.

Como presión central mínima y viento máximo sostenido se consideró el valor medio para cada intervalo de la escala de intensidad de Saffir / Simpson, (citada por Rappaport y Mc Adie, 1991), el radio de viento máximo fue tomado como 20 km y la velocidad de traslación del ciclón 20 km/h.

### 3. CONCLUSIONES

La sustitución del fondo ficticio utilizado en el MONSAC1 por una base batimétrica real fue un reto que se venció satisfactoriamente, creándose una segunda versión (MONSAC2) para la modelación dinámica de la surgencia en Cuba.

Al incluir la batimetría real fue necesario incluir nuevas condiciones de fronteras al modelo.

El modelo obtenido es de baja resolución, considera la costa como una pared vertical y por lo tanto no brinda información directa sobre las inundaciones en tierra.

Con este modelo se tiene en Cuba una herramienta para pronosticar objetivamente uno de los eventos más dañino y peligroso de los asociados a un ciclón tropical.

Un producto de utilidad para confeccionar los planes de evacuación es el EOHW.

#### REFERENCIAS

Avila, L. A. (1993): Tropical Cyclone Structure. Forecaster Report. En WMO Tropical Meteorology Research Programme. Report Series. Report No. 46 WMO/TD No. 573, pp 37-54.

García O. y R. Pérez Parrado (1994): "Modelación numérica de la surgencia provocada por los huracanes en los alrededores de Cuba. Primera versión. MONSAC1". En Memorias del VIII Congreso Brasileiro de Meteorología, II Congreso Latino-Americano e Ibérico de Meteorología. "La Meteorología en la Prevención de los Desastres". Vol. 2 pp 502-509.

Harris, D. L. , y Ch. Jelesnianski (1964): Some problems involved in the numerical solutions of tidal hydraulics equations. MWR Vol. 92, NO. 9 Dec. Pp. 409-422.

Jarvinen, B. R. y J. Gebert (1986): Comparison of observed versus SLOSH model computed storm surge hydrographs along the Delaware and New Jersey shorelines for hurricane Gloria, September 1985. NOAA Technical Memorandum NWS, NHC 32.

Jelesnianski Ch. P. (1966): Numerical computations of storm surges without bottom stress. MWR Vol. 94, No 6, June pp 379-394.

-----, J. Chen y W. Shaffer (1992): SLOSH Sea, Lake and Overland Surges from Hurricanes. NOAA Technical Report NWS 48.

Mesinger, F. y A. Arakawa (1976): Numerical methods used in atmospheric models. Global. Global Atmospheric Research Programme. WMO-ISCU Joint Organizing Committee. GARP Publication Serie No. 17, 64 pp.

Rappaport, E. N. y C. J. Mc Adie (1991): Hurricane Gilbert (1988) in review and perspective NOAA Technical Memorandum NWS, NHC 45.

WMO (1978): Chapter 7. Field Survey of storm surge. En report No. 13. Present Techniques of Tropical Storm Surge Prediction. WMO No. 500 pp 72-75.

----- (1993): Topic Rapporteur reports of the Third WMO/ISCU International Workshop on Tropical Cyclones (IWTC-III). WMO/TD No. 573.

## APLICACIONES DEL MODELO MONSAC-2 EN LAS COSTAS DE CUBA

*Rafael Pérez Parrado, Omar Gracia Concepción, Isidro Salas García  
Instituto de Meteorología. Cuba*

**RESUMEN:** Se calculan los periodos de retorno de las surgencias producidas por los ciclones tropicales en 26 tramos de las costas de Cuba. Para determinar la altura de las surgencias; estas se modelan numéricamente para los sectores de costas mencionados, teniendo en cuenta sus periodos de retorno por intensidades. Se encuentran los tramos de costa mas peligrosos, para la ocurrencia de surgencias notables, desde el punto de vista de frecuencia y condiciones fisico-geográficas.

**ABSTRACT:** The recurrency periods for storm surges in 26 sectors of the Cuban coast are calculated. The surges were modelled numerically taking into account intensity and bathymetry in each sector. Based on the frequency and physical factors, the most dangerous sectors are selected.

### Introducción

La práctica ha demostrado que las inundaciones del mar producidas por los ciclones tropicales en la Cuenca del Caribe, el Golfo de México y particularmente en Cuba, son relativamente frecuentes y muy peligrosas para algunos sectores de la costa, sobre todo para aquellos en que la plataforma insular es muy llana y las aguas poco profundas (Conner, Kraft y Harris, 1957).

En estos casos pueden producirse mareas excepcionalmente grandes, como ocurrió en el huracán de noviembre de 1932 en Santa Cruz del Sur, donde el nivel del mar subió mas de 6 metros y el pueblo desapareció por completo; hubo mas de 3000 muertos en esta catástrofe (Dunn y Miller, 1961).

Otro caso notable es el del huracán de octubre de 1944, aquí la marea borro del mapa el caserío nombrado El Cajío y el agua penetró mas de 12 km. tierra adentro en la Zona de Guanimar, la altura del nivel del mar fue también de aproximadamente 6 metros.

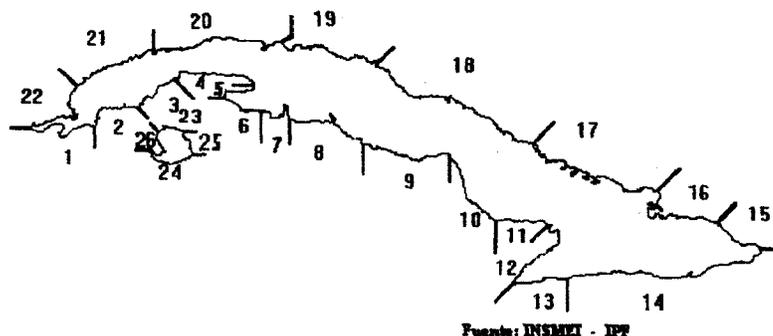
Han ocurrido otros casos menos notables, pero también importantes como son el huracán de 1926 con mas de 3 metros de surgencia en Batabanó, y el huracán Kate en noviembre de 1985 con dos metros en la Isabela de Sagua; así podemos citar alrededor de 10 huracanes con mareas notables en Cuba en el último siglo.

La mejor forma de calcular el efecto de las surgencias es utilizar modelos numéricos (Jelesneanski 1965,1972,1992). Utilizando el modelo presentado por García y Pérez Parrado (1995), se realizó un estudio de las costas de Cuba y se procedió al cálculo teórico de las mareas máximas y de los perfiles para 26 tramos de las costas cubanas, ver la tabla 1, y figura 1, así como la determinación de las cotas de inundación con las condiciones de batimetría del lugar. Para realizar este trabajo se utilizo una tormenta standard con las siguientes características.

1. La velocidad de traslación de 20 km./h
2. Radio de vientos máximos de 20 km.
3. Todos lo demás parámetros son variables

Tabla 1. Sectores de la Costa Cubana tomados para el cálculo de la Marea de Tormenta y el perfil. (\*) indica los sectores con alto riesgo de inundación

SECTORES DE LA COSTA	
<u>Costa Sur</u>	
Sector 1.....	Cabo de San Antonio a Cabo Francés
" 2.....	Cabo Francés a Estero de los Caimanes
" 3.....	Esteros de los Caimanes a Punta Salina (*)
" 4.....	Punta Salina a Ensenada de Mijares (*)
" 5.....	Ensenada de Mijares a Punta Gorda (*)
" 6.....	Punta Gorda a Punta Macurijes (*)
" 7.....	Punta Macurijes a Punta de Cazones
" 8.....	Punta de Cazones a Punta María Aguilar
" 9.....	Punta María Aguilar a Ensenada de Sibarimar
" 10.....	Ensenada de Sibarimar a Punta San Juan (*)
" 11.....	Punta San Juan a Punta Birama (*)
" 12.....	Punta Birama a Cabo Cruz (*)
" 13.....	Cabo Cruz a Punta Caimán Grande
" 14.....	Punta Caimán Grande a Punta Maisí
<u>Costa Norte</u>	
Sector 15.....	Punta Maisí a Punta Guarico
" 16.....	Punta Guarico a Punta Lucrecia
" 17.....	Punta Lucrecia a Punta Piedras
" 18.....	Punta Piedras a Cayo la Vaca (*)
" 19.....	Cayo La Vaca a Península de Hicacos (*)
" 20.....	Península de Hicacos a Punta Gobernadora
" 21.....	Punta Gobernadora a Punta Lazo
" 22.....	Punta Lazo a Cabo de San Antonio



Fuente: INSMET - IFF

Figura 1. Sectores de la costa para los cuales se realizó el estudio .

Se trabajó para una escala de 7 intensidades determinándose los periodos de retorno para cada categoría y en cada uno de los 26 tramos de costa seleccionados .

## RESULTADOS

Los resultados para el sector 4, se presentan en la figura 2 en la que se dan los valores de la marea máxima y los periodos de retorno para las diferentes escalas de intensidades. También se muestran los periodos de retorno para la velocidad del viento, derivada a partir de las presiones mínimas según la escala de intensidades, acorde con la formula de Flecher (1955) y para la presión ejercida sobre un superficie perpendicular al viento, derivada a partir de la expresión de la energía cinética , para el cálculo de los periodos de retorno se utilizó la propuesta del SNIP (1983) expresada por la función siguiente:

$$C/A = n,m/N.M$$

donde n...cantidad de casos en el círculo de radio 100 km.

m...numero de casos de cada categoría ( en orden descendente)

N...cantidad total de casos en el área (10-30 N, 60-100 W)

M...cantidad de años de la serie

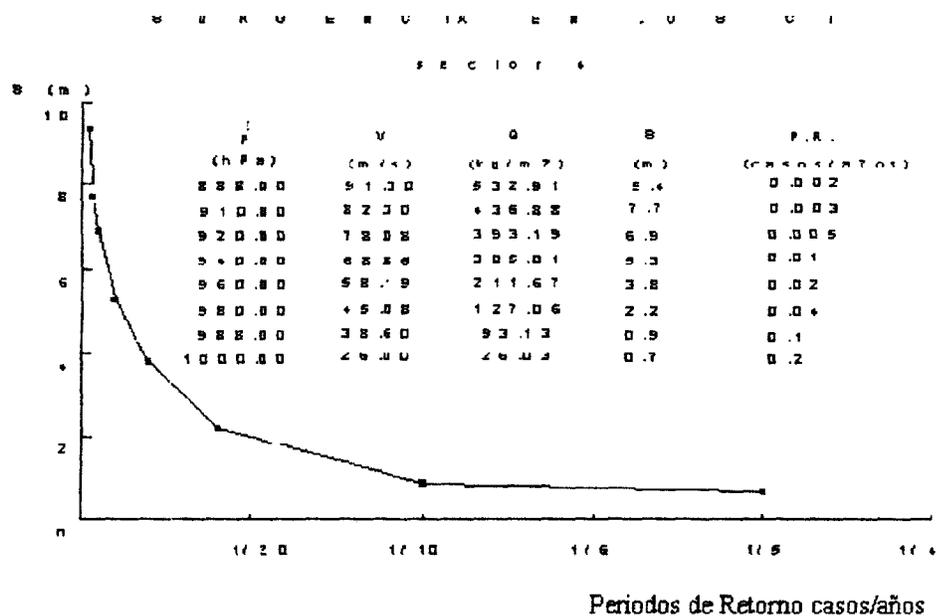


Fig.2 Periodos de retorno para el sector 4 de las costas cubanas.

Para el cálculo de los periodos de retorno se procedió de la siguiente manera:

Se procesaron por medio del SIE (1994) los huracanes que cruzaron por la región geográfica comprendida entre los 60 y 100 grados del longitud Oeste y los 10 y 30 grados de latitud Norte, y a continuación se clasificaron en siete intervalos de intensidad (m) acumulativos, después se seleccionaron en un radio de 100 km., los ciclones tropicales que pasaron por el entorno de cada uno de los 26 puntos costeros utilizados para este trabajo (n). Esta muestra estadística comprende un periodo de 100 años (M) desde 1890 hasta 1990.

En la figura 3 se muestran el perfil real y el modelado con el MONSAC-2 García y Pérez Parrado. (1995). para el huracán de octubre de 1944, en la costa sur de La Habana.



Fig. 3 Perfil real y modelado de la surgencia del ciclón de Octubre de 1944

## CONCLUSIONES

De acuerdo a los cálculos realizados y a los resultados obtenidos en dichas pruebas podemos afirmar que este modelo, es muy confiable debido a que tiene en cuenta casi todos los factores que originan surgencias y puede ser utilizado para realizar pronósticos en tiempo real y para realizar estudios o investigaciones sobre las características hidrometeorológicas de cualquier punto de la costa cubana, en las que se pretenda ejecutar cualquier tipo de construcción, ya sea con fines turísticos, industriales o de cualquier índole.

Las tablas con los periodos de retorno son muy valiosas sobre todo para estudios de Planificación Física y evaluación de impactos por inundaciones costeras y sirvieron de base par la confección de los mapas de peligro y riesgo de la República de Cuba.

## REFERENCIAS

Conner, W.C., R. H. Kraft y D. L. Harris (1957): Empirical Methods for Forecasting the Maximun Storm Tide Due toHurricanes and Other Tropical Storms. MWR, Vol 85, No. 4 pp. 113-116.

Dunn G.E., and B.L., Miller (1961): "Atlantic Hurrricanes".326 pag.Instituto del Libro, La Habana, Cuba.

Fletcher P.D. (1955): Computation of maximum winds in hurricanes. Bull. Amer. Met. Soc., Vol.36. pp. 246-250.

García, A. y P. Beaubalet (1994) : Sistema de información estadística (SIE). Inédito, UDICT, Instituto de Meteorología.

García , O., y R. Pérez Parrado (1994):Modelación numérica de las surgencias provocadas por los Huracanes en los alrededores de Cuba.Primer versión MONSAC1. En memorias del VIII Congreso Brasileiro de Meteorologia, II Congreso Latino-Americano e Ibérico de Meteorologia." La meteorologia en la prevención de los desastres". Vol.2. pp 502-509.

Jelesnianski, C. P. (1965): A numerical calculation of storm tides induced by a tropical storm impinging on a continental shelf. MWR vo. 93, No. 6. June pp. 343-358.

-----, (1972): SPLASH (SPECIAL PROGRAM TO LIST AMPLITUDE OF SURGES FROM HURRICANES) I.Land Fall Storms NOAA Technical Memorandum NWS,TDL- 46, 52 p.

-----, J. Chen y W. Shaffer (1992): SLOSH Sea, Lake and Overland Surges from Hurricanes.NOAA Technical Report NWS 48.

Harris D.L.,(1959) : An interim hurricane storm surge forecasting guide.NHRP Report No.32,US Weather Bureau, 24 pp.

Miyasaki, M., T. Ueno y S. Unoki (1961): Reprinted from the Oceanographical Magazine Vol. 13. No. 1. (1961): Reprinted from the Oceanographical

Pérez Parrado, R. (1974): " Pronóstico de las mareas máximas en los ciclones tropicales" [inédito] UDICT del Instituto de Meteorología, Academia de Ciencias de Cuba, La Habana.

SNIP (1983): Normas y reglas de construcción; cargas y acción sobre las obras hidrotécnicas. [En ruso]: SNIP 2.0604-82, Moscú, Stroizdat. 38 pp.

## MAPA DE PELIGRO POR SURGENCIAS DE CICLONES TROPICALES

Isidro Salas García<sup>1</sup>, Rafael Pérez Parrado<sup>1</sup>, Omar García Concepción<sup>1</sup>, Carlos Rodríguez Otero<sup>2</sup> y Ada Luisa Pérez Hernández<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Meteorología, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

<sup>2</sup> Instituto de Planificación Física, Ministerio de Planificación y Economía

**RESUMEN:** Se confecciona el Mapa de Peligro por Surgencias de Ciclones Tropicales para la República de Cuba con el apoyo del Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo a través del Proyecto "Desarrollo de la Técnicas de Predicción y reducción de su acción destructiva". Se parte de los resultados de modelos matemáticos para el cálculo de las Surgencias en los Ciclones Tropicales del Instituto de Meteorología, se analizan los factores meteorológicos y físico-geográficos para determinar el grado de peligro por surgencias de ciclones tropicales, el cual se presenta en mapas por sectores costeros, zonas y subzonas para Cuba y la Isla de la Juventud.

**ABSTRACT:** The Hazard Chart by Tropical Cyclones surges for the Republic of Cuba with support of the UNDP through the Project, Development of Prediction Techniques of Coastal Floods. Prevention an Reduction of its Destructing Action, is prepared. Based on storm surges numerical modeling and the Statistical Information System for Tropical Cyclones of the Institute of Meteorology, the degree of danger by tropical cyclones surges are discussed. The results are shown on the chart of coastal stretches, zones and sub-zones of Cuba and Island of Youth.

### 1. Introducción

Cuba por su posición geográfica es en ocasiones afectada por sistemas meteorológicos tales como: ciclones tropicales ( CT ), frentes fríos fuertes e intensas bajas extratropicales. Estos sistemas producen en el país con cierta frecuencia inundaciones costeras, las cuales han sido reportadas por diferentes autores, entre ellos Moreno y Salas, (1976) han señalado la ocurrencia de algunas inundaciones costeras notables debido al fenómeno conocido como *surgencia*, el cual va asociado a los CT.

Surgencias devastadoras han ocurrido en Cuba en varias oportunidades, sobresaliendo las asociadas con el huracán de Santa Cruz del Sur ( Noviembre de 1932 ) y la ocurrida en el Golfo de Batabanó en Octubre de 1944, donde el agua penetró 12 kilómetros tierra adentro por el asentamiento costero de Guanímar ( Moreno y Salas, 1976 ).

En el presente trabajo se presenta la metodología seguida para la construcción del mapa de peligro por surgencias para Cuba.

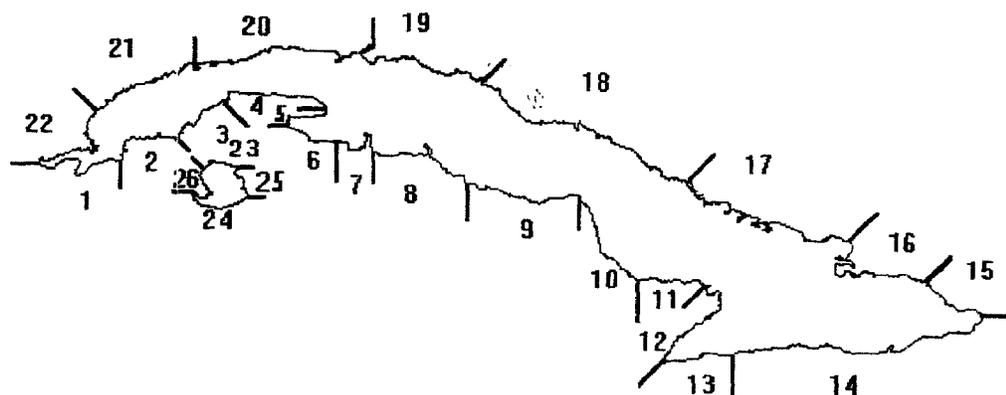
### 2. Método de cálculo y bases de datos

Para realizar este estudio se tomó como base, el trabajo sobre el peligro de inundaciones costeras realizado por Lezcano y Pérez Hernández, (1992), el Sistema de Información Estadístico (García y Beauballet, 1992) del Instituto de Meteorología (INSMET) y los modelos matemáticos confeccionados por García y Pérez Parrado ( 1994 y1996 ).

### 3. Análisis físico - geográfico

La evaluación del peligro o amenaza comprende el análisis de los registros históricos formales e informales y la interpretación calificada de los mapas existentes tales como: topográficos, hidrológicos, geomorfológicos, etc.

Se efectuó un estudio físico - geográfico de las costas de Cuba y la Isla de Juventud, a partir del cual se seleccionaron 26 sectores costeros ( Figura 1 ), que responden a las necesidades del trabajo.



Fuente : INSMET - IPF

Figura 1 Mapa de sectores costeros según características físico - geográficas

Después de efectuar un riguroso análisis de la pendiente costera y de los intereses económicos involucrados a lo largo del litoral se determinaron las siguientes Cotas de trabajo :

**Cotas de trabajo ( metros )**

0,5; 1,0; 2,0 ; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0

Se define como *peligro* la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno dañino en un determinado tiempo y espacio ( UNDRO, 1991). En el caso que se estudia el *peligro* viene dado por una combinación de los *factores físicos - geográficos* y de los *factores meteorológicos* ( UNDRO , 1991 ); específicamente los factores físicos - geográficos son la morfología de la costa (tipo de costa y pendiente costera ) y la batimetría de la plataforma insular, por lo que el *peligro* se podría representar por la siguiente expresión :

$$PELIGRO = SURGENCIA + [ MORFOLOGIA DE LA COSTA + BATIMETRIA ]$$

En este estudio el factor meteorológico es la surgencia mientras que los factores físicos - geográficos son la morfología de la costa y la batimetría.

Para evaluar la componente del *peligro* dada por la *surgencia* se utilizaron los resultados obtenidos por Pérez Parrado, García y Salas ( 1995), estableciéndose el siguiente criterio :

**1- Muy significativa :** Donde la altura puede ser  $\geq 5$  m., mientras que la cota inferior de 0,5 metros mantiene períodos de retorno bajos, entre 5-8 años.

**2- Significativa :** La altura puede ser  $\geq 4$  m.  $< 5$  m., mientras que en la cota de 0,5 metros los períodos de retorno están entre 8-10 años.

**3- Medianamente significativa:** La altura puede ser  $\geq 3$  m.  $< 4$  m., manteniendo periodos de retorno no mayores de 19 años en la cota de 0,5 metros.

**4- Poco significativa :** La altura puede ser  $\geq 0.5$  m.  $< 3$  m., con periodos de retorno iguales o menores a los 25 años en la cota de 0,5 metros.

Al analizar la morfología de las costas de Cuba mediante el Nuevo Atlas Nacional de Cuba, (1989), se asumieron las cinco categorías según los grados de pendiente que se presentan a continuación :

<b>CATEGORIAS</b>	<b>Grados</b>
1- MUY BAJA	$< 0,5$
2- BAJA	0,5-1,0
3- MODERADA	1,0-3,0
4- ALTA	3,0-5,0
5- MUY ALTA	$>5,0$

#### **4. Resultados**

Al combinar los factores meteorológicos con los físicos - geográficos para los 26 sectores costeros que se analizan en este estudio se obtuvo la valoración del *peligro*, mostrada en los siguientes ejemplos.

##### **SECTOR 1**

- La altura de la surgencia es poco significativa.
- Costa alta de terrazas aplanadas, abrasiva y aplanada abrasiva de fallas, la pendiente es baja.
- Plataforma insular estrecha desprovista de cayería, con escarpe en su borde.

**VALORACION DEL PELIGRO : MODERADO**

##### **SECTOR 2**

- La altura de la surgencia es significativa.
- Costa baja abrasiva - acumulativa y acumulativa con pequeños tramos abrasivos y acumulativos, la pendiente es muy baja.
- Plataforma con poca profundidad conteniendo a la cayería de San Felipe que cubre parcialmente el sector.

**VALORACION DEL PELIGRO: ALTO**

##### **SECTORES 3, 4 Y 5**

- La altura de la surgencia es muy significativa, la más alta de los 26 sectores.
- Costa baja acumulativa con pequeños tramos abrasivos - acumulativos y acumulativos biogénicos, la pendiente es muy baja.
- Estos sectores contienen la parte más amplia de la plataforma insular cubana con poca profundidad, en ellos se encuentra el Golfo de Batabanó y la Ensenada de la Broa, la cayería está distante de la costa.

**VALORACION DEL PELIGRO: MUY ALTO**

**SECTOR 8**

- La altura de la surgencia es poco significativa.
- Costa alta dentada, abrasiva y abrasiva - acumulativa en el tramo oeste al este del sector la costa es abrasiva acumulativa y dentada, abrasiva y erosiva tectónica, pendientes altas y muy altas con pequeños tramos con valores bajos.
- Plataforma estrecha, desprovista de cayos y barreras coralinas, escarpe en su borde.

**VALORACION DEL PELIGRO: BAJO**

Los demás sectores se valoraron de la misma forma.

Producto de este análisis se obtuvo el Mapa de Peligro de Surgencias de Ciclones Tropicales por sectores costeros para Cuba y la Isla de la Juventud ( Figura 2 ).

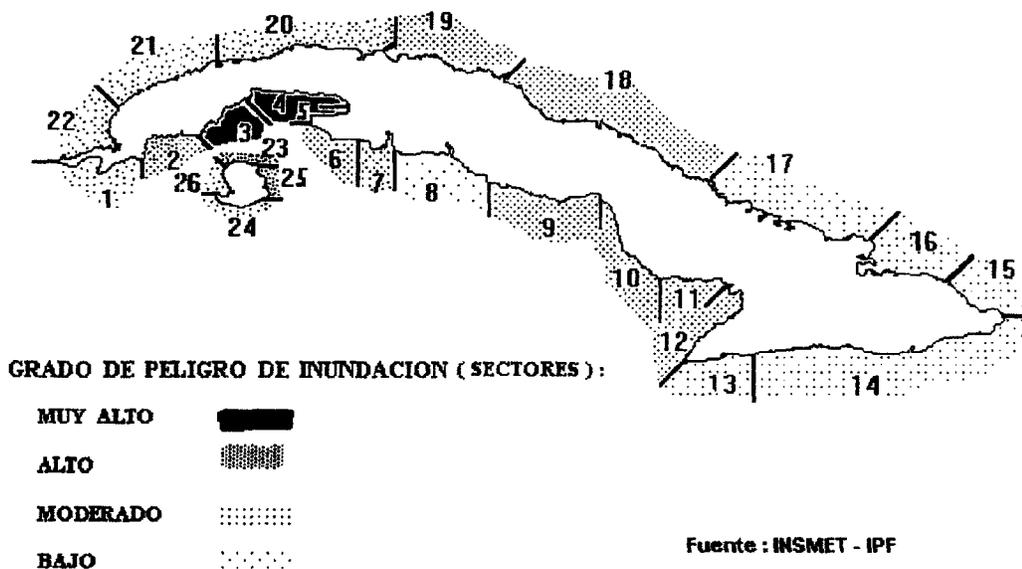


Figura 2 Mapa de peligro de surgencias de ciclones tropicales por sectores costeros

Como puede apreciarse en la Figura 2 existen diferentes sectores que presentan una valoración similar del *peligro*, luego para obtener una visión más general del *peligro* y de acuerdo a las necesidades del Instituto de Planificación Física se crearon zonas y subzonas que agrupan aquellos sectores con igual valoración del *peligro*, quedando cuatro zonas y cinco subzonas según el orden de gravedad del fenómeno ( Figura 3 ):

- **Zona I** : Comprende los sectores con un grado de peligro MUY ALTO ( Sectores 3, 4 y 5 )
- **Zona II** : Contiene cinco subzonas ( IIa, IIb, IIc, IId y IIe ) que agrupan los sectores con un grado de peligro ALTO ( Sectores 2, 6, 9, 10, 11, 12, 18, 19, 23 y 25 )
- **Zona III** : Abarca cuatro subzonas ( IIIa, IIIb, IIIc y IIId ) que contienen los sectores con un grado de peligro MODERADO ( Sectores 1, 7, 20, 21, 22, 24 y 26 )
- **Zona IV** : Comprende tres subzonas ( IVa, IVb y IVc ) que abarcan a los sectores con un grado de peligro BAJO ( Sectores 8, 13, 14, 15, 16, 17, )

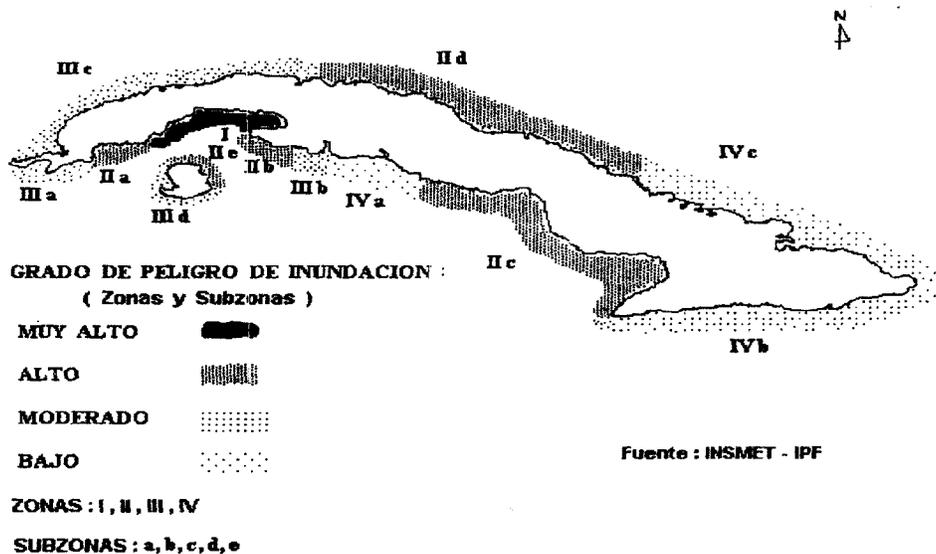


Figura 3 Mapa de peligro por surgencias de ciclones tropicales por zonas y subzonas

Aún cuando las condiciones de peligro, están presentes con diversas intensidades en la totalidad del litoral nacional y existir un estimado de asentamientos afectables por estos conceptos, los reportes sólo recogen la ocurrencia de las inundaciones por sobreelevación del nivel del mar en 49 de ellos, los que no necesariamente se hallan en las condiciones extremas. Esto se debe a las características, de las trayectorias de los ciclones tropicales en los últimos 100 años, de la batimetría y del relieve costero.

Una explicación merece el caso de la surgencia ocurrida en Santa Cruz del Sur que ocasionó la mayor catástrofe natural ocurrida en Cuba, este asentamiento no se encuentra en los sectores valorados como de peligro muy alto, debido a que la frecuencia de cruce de los CT en la región oriental del país es mucho menor que en la suroccidental donde se encuentran agrupados los sectores de mayor peligro de Cuba. Además a ello se une que en los sectores 10 y 11 donde se localiza este asentamiento existe una plataforma insular no tan amplia y poco profunda como la de los sectores de mayor peligro, estando la protección natural muy bien definida (cayos y barreras coralinas) lo cual puede contribuir a la disminución de los efectos de la surgencia.

## 5. Conclusiones

El Mapa de Peligro por Surgencias de Ciclones Tropicales para la República de Cuba, es una herramienta útil para satisfacer los múltiples intereses que tienen organismos del estado (Instituto de Meteorología, Instituto de Planificación Física, Defensa Civil, Ministerio de Turismo, etc.) a lo largo del litoral cubano, en la protección y salvaguarda de los cuantiosos recursos humanos y materiales que se encuentran en esa zona, a la vez que permite dictar la política y medidas a seguir para el asentamiento y desarrollo de la población en territorios de alta sensibilidad, así como para la localización y planificación de futuras inversiones en áreas del litoral.

**REFERENCIAS**

García, A., y P. Beauballet (1992) : Sistema de información Estadístico. Primer Congreso Ibero Americano de Meteorología. Tomo I, pp, 299-302.

García, O. y R. Pérez Parrado (1994) : Modelo numérico de surgencia alrededor de Cuba, (MONSAC1). Segundo Congreso Ibero Americano de Meteorología Tropical, Brasil. Tomo II, pp. 502-509.

García O. y R. Pérez Parrado (1996) : Modelo numérico de la surgencia, (MONSAC2 ).Boletín Electrónico de La Sociedad Meteorológica de Cuba. Vol.2, No.1.

IPCC (1992) : Panel Intergubernamental de Cambio Climático. Resumen de Informe de Evaluación

Lezcano, J. C, y A. L., Pérez Hernández (1992) : Peligro de inundaciones costeras a partir de la incidencia de eventos meteorológicos extremos y la pendiente costera. (inédito).INSMET., IPF.

Moreno A. y I. Salas (1976) : Surgencias originadas por las tormentas tropicales sus causas y efectos. Academia de Ciencias de Cuba, 23 pags.

Nuevo Atlas Nacional de Cuba (1989) : De. Instituto de Planificación Física. 50 pags.

Pérez Hernández , A. L., C., Rodríguez y I. Salas (1996) : Evaluación de; Riesgo por inundaciones costeras en Cuba. Instituto de Planificación Física . 56 pags.

UNDRO (1991) : Oficina del coordinador de las Naciones Unidas para el Socorro en caso de Desastre. Vulnerabilidad y evaluación del Riesgo, Programa de entrenamiento para el manejo de desastres. 61 pags.

Pérez Parrado R., O. García y I., Salas (1995) : Mareas de Tormenta en Cuba. Su amplitud y perfil. (Inédito). UDICT del INSMET. 28 pags, vol2, No.1.

## FORECASTING TROPICAL CYCLONE INTENSITY CHANGES: AN OPERATIONAL CHALLENGE.

*Lixion A. Avila*

*National Hurricane Center, Miami Florida*

### 1. INTRODUCTION

The problem of forecasting tropical cyclone intensity change continues to be a real challenge for tropical meteorologists despite the recent advances in numerical weather prediction. The National Hurricane Center (NHC) 24 and 72 hour official forecast intensity errors for the Atlantic basin since 1990 are shown in Fig.1. An inspection of the figure clearly shows that no significant improvement has been made during that period and, in general, the average errors are about 10 and 20 knots for 24 and 72 hour period respectively. Overall, these errors appear to be small and indeed they are. However, the real challenge is to forecast those cases of rapid intensification or decay, particularly if they occur just prior to or at landfall.

Fig. 2 shows the 24- and 72- hour intensity forecasts and the best track intensities for eastern Pacific Hurricane Linda during September 1997. Note that none of the official forecasts captured the rapid intensification of the hurricane which occurred between 1800 UTC 11 September and 0000 UTC 12 September. In fact, the 72 hour intensity forecast valid for 1800 UTC 12 September was underestimated by 100 knots. There are numerous examples of tropical cyclones which exhibit rapid changes in intensity. Commonly, these cases are difficult, if not impossible, to predict with present knowledge and tools.

Hurricane Andrew in August 1992 intensified significantly twice. First, when it was approaching the Bahamas and then again just before making landfall over South Florida. Hurricane Opal in October 1995 jumped from a Category 3 to 5 on Saffir-Simpson hurricane scale (Saffir and Simpson, 1974) in a matter of a few hours. Fortunately, Opal's rapid intensification occurred in the central Gulf of Mexico and not near the coast. Hurricane Bertha in July 1996 suddenly strengthened at landfall near Wilmington N.C., after a period of weakening. It is an important goal to produce the best possible intensity forecast at landfall. Actions taken by the emergency management community, mainly with respect to the different levels of evacuations along the coast, are closely tied to the forecasts.

Extratropical transformation is another difficult problem related to intensity changes and in general, little is known about it. Hurricane Erika in September 1997 is a typical example. Erika was already moving northeastward embedded within a mid-latitude trough and was forecast to become extratropical in a period of 36 to 48 hours. Instead, the hurricane kept its warm core longer than anticipated and passed by the Azores producing hurricane force wind gusts and heavy rain in some of these islands.

## 2. DISCUSSION

### 2.1 Diagnosis of the cyclone.

One of the primary tasks of the forecaster is to be able to detect the genesis of a tropical cyclone and the potential for intensification, dissipation and extratropical transformation.

Once it has been determined that a tropical cyclone has already formed, the forecaster is required to determine its maximum intensity, which is defined as the maximum 1-min sustained wind at the 10-m level. In spite of advanced satellites, aircraft and other new technology, the measurement of that parameter is highly uncertain. Even in rare cases, when a tropical cyclone moves over a wind gage, in general, there are problems with the wind averaging period, as well as the exposure, elevation, survival and calibration of the instrument. Assuming that a reconnaissance aircraft has sampled the area of maximum winds, the flight-level wind data has to be adjusted to 10-m level. Powell et. al. (1996) have worked extensively on the wind adjustment to the surface. However, there is no unique formula or methodology available for the adjustment. Data from the new Global Positioning System (GPS) sondes dropped within the inner core of the hurricane will shed new light on the problem.

In most of the world's basins, the intensity of tropical cyclones is estimated from satellite using the Dvorak (1984) technique. This method is primarily based on cloud pattern recognition and is highly subjective.

### 2.2 Forecasting the cyclone and its environment.

Once the forecaster has estimated the initial state of the tropical cyclone and its environment, in general, there are only a few parameters which the forecaster uses to determine the potential for intensity changes. Most common are sea surface temperature (sst), variation in surface pressures, and vertical shear of the horizontal wind. However, many of these parameters are in general difficult to measure due to the lack of observations. Upper-tropospheric trough interactions, which can be traced back to Riehl (1954), are features which are also taken into consideration during the preparation of the intensity forecast. This theory is once again becoming rejuvenated within the hurricane community (See Molinari and Vollaro, 1989). The problem here is that it is hard to determine subjectively and operationally when the trough interaction will produce a favorable or unfavorable environment for the tropical cyclone to intensify. However, there is hope with the recent improvements in numerical modeling.

Forecasters can also infer short-range changes in intensity from the cloud pattern observed in satellite images or radar. For example, the shear pattern, which is a general sign of steady state intensity or weakening, is determined by the location of the low-level cloud circulation with respect to the deep convection. Eyewall replacement cycles are commonly associated with intensity fluctuations as indicated by Willoughby et al, 1982. It is difficult to detect such small scale eyewall cycles unless there is a constant radar or aircraft surveillance. Moreover, the time scale of these cycles appears to vary from one hurricane to another. For example, the time period in between eyewall replacements during Hurricane Allen in 1980 was a day or two while in Hurricane Andrew it was less than 12 hours.

There are numerous models available to forecast the track of tropical cyclones. However, only a few models are operationally available to address the intensity problem. For intensity up to 72 hours, the SHIFOR model, which is based on climatology, is the most commonly used. SHIPS

model predicts intensity up to 72 hours and uses climatology and persistence as well. It also includes predictors such as the sst, the vertical shear of the horizontal wind, the 200 mb eddy flux convergence of relative angular momentum and upper-tropospheric temperature. Details of this model can be found in DeMaria and Kaplan, 1994.

Several Global models and the Geophysical Fluid Dynamic Laboratory (GFDL) model are also used as guidance to predict changes in intensity associated with tropical cyclones. In general, the GFDL model overestimates the intensity of tropical cyclones and global models, in most cases, do not represent correctly the tropical cyclone in its initial stage. At least in the Atlantic, the models tend to underestimate the intensity of the mid-oceanic upper-level troughs. Instead, the models incorrectly forecast an anticyclonic upper-level and reduced environmental shear (in comparison to the verification) which appears to be favorable for tropical cyclones to intensify.

### 3. Conclusions

1. An accurate intensity forecast is extremely important in the warning process, primarily because emergency management decision-making is closely tied to the intensity of landfalling tropical cyclones.
2. It is difficult to determine the initial intensity of a tropical cyclone due to the lack of reliable observations.
3. Very little guidance is currently available to forecast intensity changes. Extrapolation is basically the most commonly used rule.
4. The process that lead to changes in intensity of a tropical cyclone appears to be closely related to changes in structure, primarily of the inner core. Most of the time, there is no information available. Even when there is information, it has not been translated into forecasting tools.
5. It is recommended that the development of intensity forecast tools be elevated to a high research priority.

### ACKNOWLEDGMENTS

The author is grateful to Dr. Richard Pasch, hurricane specialist at the NHC and Dr. Mark DeMaria for many valuable discussions.

### References

- DeMaria, M., and J. Kaplan, 1994: A statistical hurricane intensity prediction scheme (SHIPS) for the Atlantic basin. *Wea. Forecasting*, **9**, 209-220.
- Dvorak, V. F., 1984: tropical cyclone intensity analysis using satellite data. *NOAA Tech. Memo. NES 11*, 47 pp.
- Molinari, J. And D. Vollaro, 1989: External influences of Hurricane Intensity. Part I: outflow Layer Eddy Angular Momentum Fluxes. *J. of Atmos. Sc.*, **46**, 1093-1105.

Powell, M.D., S. H. Houston, and T. A. Reinhold, 1996: Hurricane Andrew's landfall in south Florida. Part I: standardizing measurements for documentation of surface wind fields. *Wea. Forecasting*, **11**, 304-328.

Riehl, H., 1954: *Tropical Meteorology*, Mc Graw-Hill, 392pp.

Saffir, H., and R. Simpson, 1974: The hurricane disaster potential scale. *Weatherwise*, August 1974, 169-170.

Willoughby, H. E., J. A., Clos and M.G. Shorebah, 1982: Concentric Eye Walls, Secondary Wind Maxima, and the Evolution of a Hurricane Vortex. *J. Appl. Sci.*, **39**, 505-514.

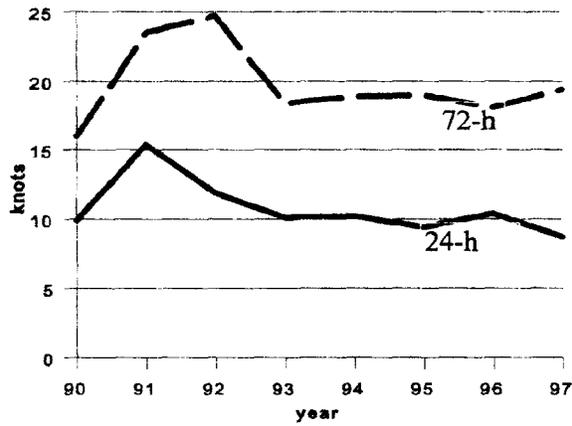


Figure 1. Atlantic basin average of the absolute NHC official intensity forecast errors for the 1990-1997 period.

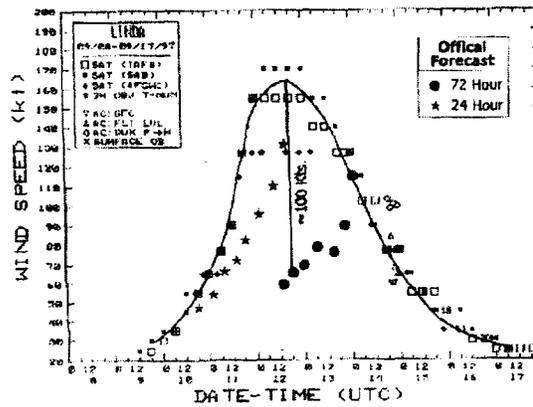


Figure 2. Preliminary best track intensity for Hurricane Linda indicated by a solid line. ★ and ● denote the 24 and 72 hours official NHC intensity forecast, respectively.

## Limitations of Tropical Cyclone Intensity Estimates from Satellite Imagery

Max Mayfield

National Hurricane Center, Miami, Florida

**ABSTRACT:** Satellites are the primary observing tools for tropical cyclones. Satellite imagery is widely used around the world to estimate tropical cyclone intensity. Minimum central pressure *estimates* from satellite imagery received in real-time at the National Hurricane Center (NHC) are compared to minimum central pressure *measurements* from reconnaissance aircraft near the time of peak intensity on selected Atlantic basin intense hurricanes.

### 1. Introduction

History records tremendous havoc caused by tropical cyclones. Large losses of life by tropical cyclones in the North Atlantic are often caused by the more intense tropical cyclones (Hebert et al. 1997 and Rappaport and Fernandez-Partagas 1995). Improvements in forecasting, communications and preparedness plans have all contributed to reducing the loss of life in many areas. Preparedness plans involve decisions concerning evacuation, sheltering, closing schools and businesses and many other often quite expensive actions. Some of these decisions are based on the forecast intensity of the tropical cyclone. For example, the evacuation required for a category three hurricane on the Saffir/Simpson Hurricane Scale (Simpson 1975) in the Galveston/Houston area of Texas involves 200,000 more people than an evacuation required for a category two hurricane (Sheets 1990). Even with a near perfect track forecast, it is still of utmost importance to have an accurate intensity forecast as well.

Intensity forecast guidance models available to the NHC include the GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory; Kurihara et al. 1995), SHIFOR (Statistical Hurricane Intensity FORecast; Jarvinen and Neumann 1979) and SHIPS (Statistical Hurricane Intensity Prediction Scheme; DeMaria and Kaplan 1997). All of these guidance models have limitations as discussed by Avila (1998). It is important to note that the GFDL, SHIFOR and SHIPS models all require the current intensity of the tropical cyclone as input. Therefore, the accuracy of any technique used to estimate the current intensity should be carefully verified against available "ground truth" when possible.

The Dvorak (1984) tropical cyclone intensity analysis technique using satellite data has been in use at various tropical cyclone forecast centers for nearly three decades. While the use of enhanced and digital satellite imagery has increased, the Dvorak intensity determination for the stronger tropical cyclones still relies primarily on the simple measurements of the eye temperature and the temperature of the coldest clouds surrounding the eye. Given the impact that an intense tropical cyclone can have, one would hope that any technique used to estimate intensity of a tropical cyclone, such as Dvorak's, would be reliable when the tropical cyclone is most intense.

This paper carefully compares the Dvorak *estimates* of minimum central pressure received in real-time at the NHC with reconnaissance aircraft *measurements* of minimum central pressure near the time of peak intensity for selected Atlantic basin intense hurricanes.

## 2. Methodology

Dvorak intensity estimates are received at the NHC from analysts of the Tropical Analysis and Forecast Branch (TAFB) in Miami, Florida, the Synoptic Analysis Branch (SAB) in Camp Springs, Maryland, and the United States Air Force Global Weather Center (AFGWC) in Omaha, Nebraska. Intensity measurements from reconnaissance aircraft are provided to the NHC primarily by the United States Air Force reserves flying C-130 aircraft out of Keesler Air Force Base in Biloxi, Mississippi, augmented occasionally by National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) personnel flying P-3 aircraft out of MacDill Air Force Base in Tampa, Florida.

Minimum central pressure and maximum sustained winds are both measures of intensity, and both are provided by satellite estimates and reconnaissance measurements. Although the NHC seeks the best available estimate of the maximum sustained one-minute "surface" wind (actually at an elevation of 33 feet) to determine the official intensity of a tropical cyclone, this study will only examine pressure because there is always uncertainty in determining the surface wind from flight level data (usually 10,000 feet). Minimum central pressure from reconnaissance aircraft is determined by dropsonde or from extrapolation within 1,500 feet of the sea surface or from the computed 925 mb or 850 mb height.

Four of the strongest hurricanes in the past decade were selected for study. The lowest minimum central pressure measured by reconnaissance aircraft anytime during the life of each hurricane was then compared to the Dvorak minimum central pressure estimates closest to the aircraft measurement.

## 3. Individual Hurricanes

Table 1 lists the lowest minimum central pressure observed by reconnaissance aircraft for hurricanes Hugo, Andrew, Opal and Fran along with operational TAFB, SAB and AFGWC satellite estimates made closest in time to the aircraft measurements. For this small sample, the satellite pressure estimates ranged from 13 to 32 mb higher than the aircraft measurements (i.e., satellite estimated hurricanes too weak). Figures 1 through 4 show "best track" curves of minimum central pressure as a function of time for these same four hurricanes. The observations on which the curves are based are also plotted and consist of aircraft reconnaissance data and Dvorak-technique estimates, as well as occasional synoptic fixes primarily after landfall. All of the figures show that considerable scatter exists between the various satellite estimates and the aircraft data.

## 4. Summary

Dvorak minimum central pressure *estimates* from satellite imagery were compared to minimum central pressure *measurements* from reconnaissance aircraft near the time of peak intensity for selected Atlantic basin intense hurricanes. The satellite pressure estimates for this small sample were found to be considerably higher than the aircraft measurements. Improper preparedness actions could result if only satellite intensity estimates were available. The continued need for *in situ* measurements from aircraft reconnaissance on hurricanes threatening land is obvious.

## REFERENCES

- Avila, L.A. (1998): Forecasting tropical cyclone intensity changes: An operational challenge. Preprints, *Symposium on Tropical Cyclone Change*, Phoenix, AZ, Amer. Meteor. Soc., 1-3.
- DeMaria, M., and J. Kaplan (1997): An operational evaluation of a statistical hurricane intensity prediction scheme (SHIPS). Preprints, *22nd Conf. On Hurricanes and Tropical Meteorology*, Ft. Collins, CO, Amer. Meteor. Soc., 280-281.
- Dvorak, V.F. (1984): Tropical cyclone intensity analysis using satellite data. *NOAA Technical Report NESDIS 11*, National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, 47 pp.
- Hebert, P.J., J.D. Jarrell, and M. Mayfield (1997): The Deadliest, Costliest and Most Intense United States Hurricanes of This Century (and Other Frequently Requested Hurricane Facts), *NOAA Technical Memorandum NWS-TPC-1*, 30 pp.
- Jarvinen, B.R., and C.J. Neumann (1979): Statistical forecasts of tropical cyclone intensity. *NOAA Technical Memorandum NWS NHC-10*, 22 pp.
- Kurihara, Y., M.A. Bender, R.E. Tuleya, and R.J. Ross (1995): Improvements in the GFDL hurricane prediction system. *Mon. Wea. Rev.*, **123**, 2791-2801.
- Rappaport, E.N. and J. Fernandez-Partagas (1995): The Deadliest Atlantic Tropical Cyclones, 1492-1994. *NOAA Technical Memorandum NWS NHC-47*, 41 pp.
- Sheets, R.C. (1990): The National Hurricane Center-past, present, and future. *Weather and Forecasting*, **5**, 185-232.
- Simpson, R.H. (1974): The hurricane disaster potential scale. *Weatherwise*, **27**, 169 and 186.

Table 1. Comparison of lowest minimum central pressure observed by reconnaissance aircraft for hurricanes Hugo, Andrew, Opal and Fran with TAFB, SAB and AFGWC satellite estimates.

Hurricane	Aircraft minimum central pressure (mb) Date (mm/dd/yy) Time (UTC)	TAFB minimum central pressure (mb) Date (mm/dd/yy) Time (UTC)	SAB minimum central pressure (mb) Date (mm/dd/yy) Time (UTC)	AFGWC minimum central pressure (mb) Date (mm/dd/yy) Time (UTC)
<b>Hugo</b>	<b>918</b> 09/15/89 1729	<b>948</b> 09/15/89 1800	<b>948</b> 09/15/89 1800	<b>935</b> 09/15/89 1332
<b>Andrew</b>	<b>922</b> 08/23/92 1648	<b>935</b> 08/23/92 1800	<b>948</b> 08/23/92 1800	<b>935</b> 08/23/92 1347
<b>Opal</b>	<b>916</b> 10/04/95 0945	<b>948</b> 10/04/95 1145	<b>948</b> 10/04/95 1145	<b>948</b> 10/04/95 1228
<b>Fran</b>	<b>946</b> 09/04/96 2306	<b>960</b> 09/04/96 2345	<b>960</b> 09/04/96 2345	<b>970</b> 09/04/96 2147





## SEGMENTO DE LA TRAYECTORIA DEL CICLON LILI DETECTADO POR LA RED DE RADARES METEOROLÓGICOS DE CUBA.

*Orlando Núñez Russis.  
Instituto de Meteorología, Cuba*

**RESUMEN:** Durante los días 17 y 18 de Octubre de 1996, el ciclón tropical Lili fue detectado por la Red de Radares Meteorológicos del Instituto de Meteorología de Cuba. Los datos operativos de la localización del ojo, mediante azimuth, distancia y hora, obtenidos por 4 radares de la región occidental, sirvieron de material básico para este trabajo. El objetivo del mismo es mostrar la utilidad de procesar estos datos con diferentes finalidades, para mejorar la información sobre el seguimiento de un ciclón tropical. Se calcularon las coordenadas geográficas de las trayectorias estimadas por estas estaciones, comparándose entre sí para conocer la efectividad de la Red. Las posibles entradas a tierra del ojo del ciclón mediante las observaciones radáricas son discutidas. Las trayectorias estimadas sobre tierra a partir de los datos disponibles de dos radares, permiten mostrar las posibles causas de los errores en la medición analógica operativa. La incorporación al programa de procesamiento de las imágenes digitalizadas del método de las espirales logarítmicas, hacen más objetivo la localización del ojo. Un método objetivo de Pronóstico Inmediato por Radar, sobre un próximo cambio de rumbo, se deriva a partir de las velocidades bi y tri horarias, con puntos tomados de forma horaria. La diferencia promedio no mayor de 30 km. extraída de este caso, en la localización del ojo entre distintos radares, muestra que el empleo de esta técnica es confiable para Cuba, a pesar de eventuales dificultades técnicas que puedan presentarse.

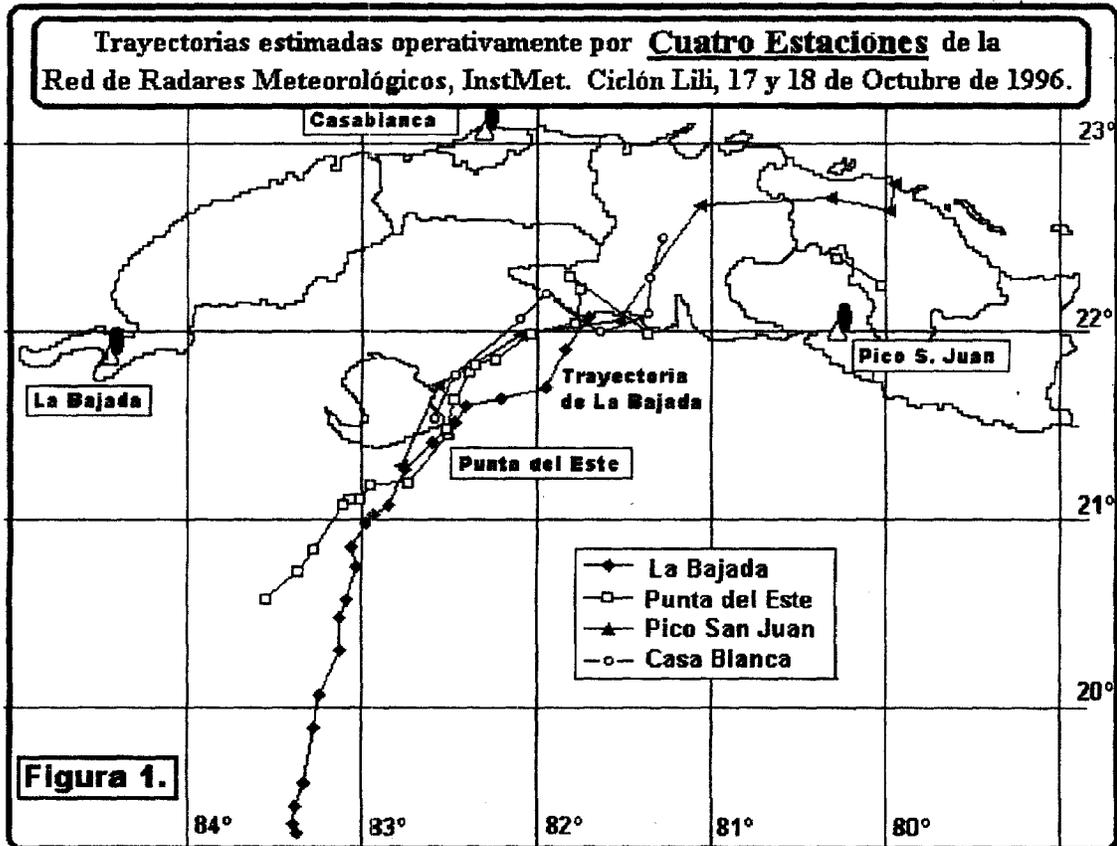
**ABSTRACT:** The Tropical Cyclone Lili was detected by the National Meteorological Radar Network, during 17th and 18th of October 1996. The warnings of the location of the eye by azimuth, range and time, of four radars of the western region, were the basic data for this work. This paper shows the utility of processing these data for different goals, in order to improve the radar information about tracking tropical cyclones. Estimated tracks obtained by four radars were compared to evaluate the effectiveness of the network as a whole. The possible landfalls of the eye by radar observations are discussed. With the available data of two radars, the estimated tracks over land are analyzed, and the possible sources of errors by the analogue measurements are shown. The objective application of the logarithmic spirals on digitized images is recommended. An Objective Radar Nowcasting method is proposed about the proximity of a direction change, based on two and three hours velocities of the eye with locations taken hourly. The analysis of the differences between radars measurements in location of the eye, with at most 30 km. in this case, shows that the use of this technique is trustworthy, in spite of eventual technical difficulties.

### INTRODUCCIÓN.

Como es conocido, los radares meteorológicos basados en tierra constituyen el medio más eficaz para la localización y seguimiento de los ciclones tropicales, una vez que estos se encuentren al alcance de los mismos. En el presente trabajo se analiza detalladamente el segmento de la trayectoria, en que el huracán Lili fue seguido de forma permanente, por la Red Nacional de Radares Meteorológicos de la región occidental de Cuba. La longitud de onda de estos equipos es de  $\lambda = 10$  cm.

### TRAYECTORIAS DE LILI ESTIMADAS POR LOS RADARES METEOROLÓGICOS.

La trayectoria seguida por el ojo del huracán Lili, en los días 17 y 18 de Octubre de 1996, en el mar al sur de Cuba y durante su paso sobre el territorio cubano, fue detectada operativamente por las cuatro estaciones occidentales de la Red de Radares Meteorológicos del INSMET.



La Bajada (LB) por primera vez detectó el ojo de Lili a las 6:30 a.m. del día 17 de Octubre de 1996, a una distancia de 305 km. y 158° de Azimuth. Este punto lo situaba en los 19° 22' de latitud Norte y 83° 23' de longitud Oeste, a unos 225 km. de la costa sur de la Isla de la Juventud. Con las primeras observaciones sucesivas se calculó que el rumbo que seguía Lili era aproximadamente de 15° a 20° Norte. Lo cual indicaba que el ojo se dirigía hacia el centro de la Isla de La Juventud.

Posteriormente y junto con el radar de LB, la estación de Punta del Este (PE) envió por primera vez un informe sobre la posición estimada del ojo a las 12:00 m. del día 17, y lo sitúa a 150 km. de este radar, entre los 20° 35' Norte con 83° 33' Oeste.

Cuando el ojo del huracán se encontraba en las cercanías de la estación de radar de PE a las 21:30, se recibe en La Habana la información de cuatro radares, sumándose en esta ocasión Casablanca (CB) y Pico San Juan (PSJ). En la figura 1 se muestran las cuatro trayectorias estimadas analógicamente de forma operativa, por las estaciones occidentales de Cuba.

Desde que el ojo del huracán se localizó sobre la estación de Punta del Este, es seguido por los cuatro radares hasta el momento que entra a tierra en la Isla de Cuba a las 6:00 a.m. del 18 de Octubre. Obsérvese que las trayectorias estimadas por los cuatro radares coinciden entre los 21° y 22° Norte, exceptuando a LB, que en las 3 últimas observaciones que realizó, se apartó del resto de las trayectorias.

## ENTRADA A TIERRA DEL OJO DEL HURACÁN.

Determinar o pronosticar el lugar de entrada a tierra de un ciclón resulta de gran importancia, debido en primera instancia al significativo impacto social y económico que representa este hecho. El otro aspecto es con relación a las características meteorológicas que presenta el ciclón en ese momento. La fuente de energía del ciclón tropical es el mar con su calor latente y a consecuencia de su superficie continua, aquél adquiere su máxima organización e intensidad relativas, instantes antes de entrar a tierra. Por otro lado, el Radar detecta con más definición la nubosidad en el mar, ya que no existe obstáculo alguno que enmascare la morfología del fenómeno. Esto resulta de gran conveniencia para la predicción de la entrada a tierra del ciclón mediante las observaciones radáricas.

A las 15:00 horas del 17 de Octubre, ambos radares LB y PE sitúan el ojo del huracán aproximadamente a unos 100 km. al sur de la Isla de la Juventud. En esta región se comienzan a sentir los efectos del huracán. A las 18:30 horas se confirma que la trayectoria había girado hacia los 40° Norte dos horas antes, lo cual indicaba que de seguir ese nuevo rumbo, el ojo cruzaría por Punta del Este. A las 21 :30 del 17 de Octubre el centro del ojo del Lili se sitúa sobre la propia estación de radar de Punta del Este. Como puede verse en la tabla 1, los cuatro radares coinciden en la posición del ojo a las 21:30, cuando cruza sobre esta estación.

Tabla 1. Latitud y Longitud del ojo del CT Lili estimada por cada estación.

Día 17 Oct. '96	Hora	Distancia	Alt Haz	Latitud	Longitud	Entrada a Punta del Este
La Bajada	21:30	200	2.367	21° 24'	82° 37'	
Punta del Este	21:30	7	0.013	21° 29'	82° 31'	
Casablanca	21:00	183	2.021	21° 32'	82° 36'	
Pico San Juan	20:30	280	1.443	21° 17'	82° 47'	
<b>Día 18 Oct. '96</b>						
La Bajada	4:30	285	4.794	22° 4'	81° 42'	Entrada a Cuba
Punta del Este	6:00	130	1.005	21° 59'	81° 22'	
Casablanca	6:00	157	1.501	22° 5'	81° 22'	
Pico San Juan	5:30	142	1.174	22° 3'	81° 32'	
<b>Día 18 Oct. '96</b>						
Punta del Este	3:00	95	0.541	22° 2'	81° 47'	Entrada aparente
Casablanca	3:45	115	0.829	22° 12'	81° 58'	

Debido a la distancia a que se encuentra cada radar con relación a la zona nubosa observada, la altura del eje del haz de cada radar es diferente: LB - 2.4 km., PE aproximadamente 0 km., CB - 2.0 km. y PSJ - 1.4 km. Aparentemente la posición estimada más confiable es la brindada por PE, ya que el ojo pasó por encima de ella, pero desde el punto de vista radárico la posición de PSJ es más confiable, ya que puede detectar mejor la posición del centro del ojo, al observarlo desde lejos y no encima del propio radar.

La entrada a Cuba del ojo de Lili es polémica, ya que entre las 3:00 y 4:00 horas del día 18, las trayectorias radáricas estimadas indican que el ojo hace una entrada a Cuba, cerca del extremo occidental de la Ciénaga de Zapata. La Bajada está muy lejos y el eje del haz se encuentra a 4.8 km. de altura, lo cual no hace confiable su estimación de la posición. A pesar de no tener información de Pico San Juan a esta hora, el rumbo estimado por este radar también parece indicar que toca este punto. Por otro lado, las posiciones favorables de dos radares, Casablanca y Punta del Este con relación a la posición del ojo del ciclón, pueden detectarlo desde ángulos casi opuestos. Sus cercanías al mismo y el hecho de que los ejes del haz alcanzan 0.8 km. y 0.54 km. de altura respectivamente, hacen confiable la estimación de esta posición. Además, si se extrapola la trayectoria con rumbo de 40° Norte que seguía el

ciclón, coincide con la posición que ofrecen estos dos radares. Por otro lado el aviso del avión a las 3:24 horas también lo sitúa en los  $22^{\circ} 7' N$  y  $81^{\circ} 58' O$ , alrededor de esta zona. Todo parece indicar que en su movimiento, el ojo toca a tierra primero alrededor de las 4:00 a.m. en el punto  $22^{\circ} 12' N$  y  $82^{\circ}$  Oeste y posteriormente retorna al sur. A esta hora y alrededor de este lugar, ocurre otro cambio de rumbo a los  $80^{\circ}$ , o sea hacia el Este aproximadamente.

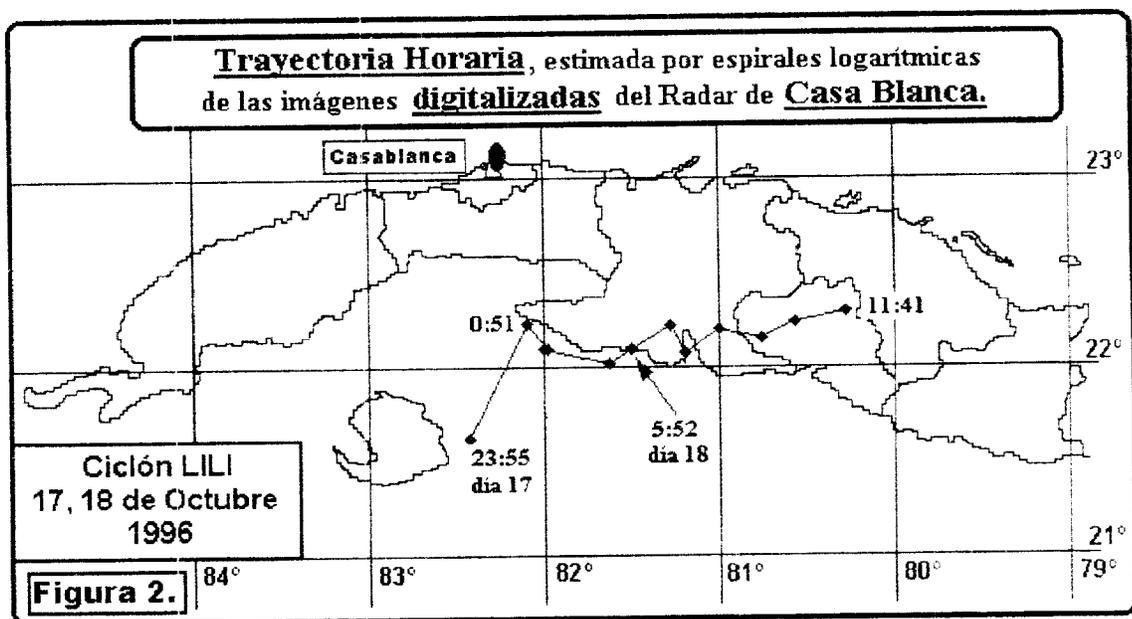
La entrada definitiva a Cuba del ojo del ciclón, determinada mediante la Red de Radares Meteorológicos del INSTMET, es aproximadamente a las 6:00 a.m. del 18 de Octubre, en los  $22^{\circ} N$  y  $81^{\circ} 22' O$ , al oeste de la Ciénaga de Zapata. Los tres radares que detectan este punto son confiables debido a que la altura de sus respectivos centros de haz electromagnético en ese punto es de: Casablanca 1.5 km., Punta del Este 1.0 km. y Pico San Juan 1.2 km.

A partir de este instante el ojo se encuentra muy distante de LB y por tanto no continúa realizando observaciones. Por otro lado PE sale fuera de servicio por falta de energía eléctrica. Solamente PSJ continúa realizando observaciones analógicas, y Casablanca, tanto analógicas como digitales.

### **TRAYECTORIA DEL OJO DEL HURACÁN SOBRE TIERRA.**

**Radar de CASABLANCA.** Es necesario aclarar que el área del ojo sin nubosidad que presentaba este ciclón, era de grandes dimensiones y por otro lado la sensibilidad del equipo receptor del radar de Casablanca era baja, lo cual ampliaba el área sin ecos perteneciente al ojo del ciclón. Este hecho dificultaba la localización de su centro en la pantalla analógica. El radar de Casablanca operativamente lo sitúa a las 6:00 horas en los  $22^{\circ} 5' N$  y  $81^{\circ} 22' O$ este y posteriormente lo sitúa siguiendo un rumbo al Norte, véase la Figura 1.

Las imágenes digitalizadas grabadas por CB comienzan desde las 22:26 horas del día 17. Para determinar la trayectoria a posteriori, del ojo del ciclón Lili mediante estas observaciones, se procedió a aplicar el método de las espirales logarítmicas para estimar la posición del ojo, empleadas principalmente para las observaciones en pantalla analógica. Esta técnica consiste en ajustar espirales logarítmicas de diferentes ángulos de cruce, a la banda exterior espiralada del ciclón en dependencia de la presión central del ojo. Teniendo en cuenta este criterio y conociendo que la presión de Lili osciló entre 977 y 974 hPa, el autor aplicó la espiral logarítmica de ángulo de cruce de  $20^{\circ}$ . Este mismo procedimiento fue aplicado independientemente por el jefe de la estación de radar de CB. También se estimó la posición del ojo, mediante el centro del círculo que mejor se ajustaba en cada caso a la pared nubosa del ojo detectado por el radar.



Las tres trayectorias obtenidas por este método muestran un movimiento oscilatorio. La causa del mismo puede deberse a errores cometidos en el correcto ajuste de las espirales y del círculo. También puede ser debido al movimiento trocoidal seguido por el ojo del ciclón, ya que el intervalo de tiempo entre observaciones digitalizadas osciló entre 15 y 30 minutos. No obstante, es evidente que la trayectoria estimada por las observaciones digitalizadas indican un rumbo hacia el Este. La figura 2 muestra la trayectoria horaria, estimada por el autor. Esta trayectoria es similar a la óptima emitida oficialmente por el INSTMET, lo cual muestra la conveniencia de utilizar este método en tiempo real y de forma automática.

**Radar de PICO SAN JUAN.** Cuando el ciclón Lili se encontraba sobre tierra y muy cercano al radar de PSJ, los ecos fijos terrenos alrededor del radar no permitían observar con claridad la posición del ojo. Se elevó la antena hasta  $+0.5^\circ$ , para evitar estos ecos y definir mejor la forma de las paredes del ojo. Por tanto, la posición del ojo se detectó, cuando el eje del volumen de sondeo radárico se encontraba a una altura entre 2.2 y 3.2 km.

Tabla 2. Posición estimada del ojo sobre Cuba.

Radar Pico San Juan			Satélite Meteorológico			
Hora L.	Latitud	Longitud	Hora L.	Latitud	Longitud	Dif. min.
20:30	21,3	82,8	19:45	21,3	82,8	45
23:30	21,7	82,6	21:45	21,7	82,6	105
2:30	22,0	82,1				
5:30	22,0	81,5	1:45	22,1	81,6	285
8:30	22,7	81,1	8:45	22,7	80,9	15
11:30	22,7	80,0				
14:30	22,8	80,0	13:45	22,6	80	45
17:30	22,8	79,9				

Es conocido que el eje del "embudo" que forman las paredes del ojo del ciclón presenta una rotación inclinada. Esta característica introduce error en la localización del ojo en superficie, si se realiza un sondeo de la zona nubosa a niveles altos. El error que se comete por esta causa es inevitable y no puede ser corregida, por lo que debe tenerse en cuenta.

Por esta razón la trayectoria determinada por el radar de PSJ, se aleja de la emitida oficialmente por el INSTMET. En el análisis de estas observaciones, se procedió a compararlas con las posiciones obtenidas con datos desde los satélites meteorológicos. Es conocido que, entre otros errores cometidos por las observaciones satelitales, se incluye aquella debido a la rotación del embudo del ojo, debido a que se observa el área nubosa desde arriba, en los niveles altos de las nubes. Como se ve en la tabla 2 la posición del ojo sobre tierra estimada por la información satelital, es similar a la ofrecida por el radar de PSJ. Este

hecho corrobora que, como ambas observaciones sondeaban el ciclón a niveles altos, no coincidían con la trayectoria en superficie, y muestran que la inclinación de la pared del ojo en ese instante era hacia el Norte.

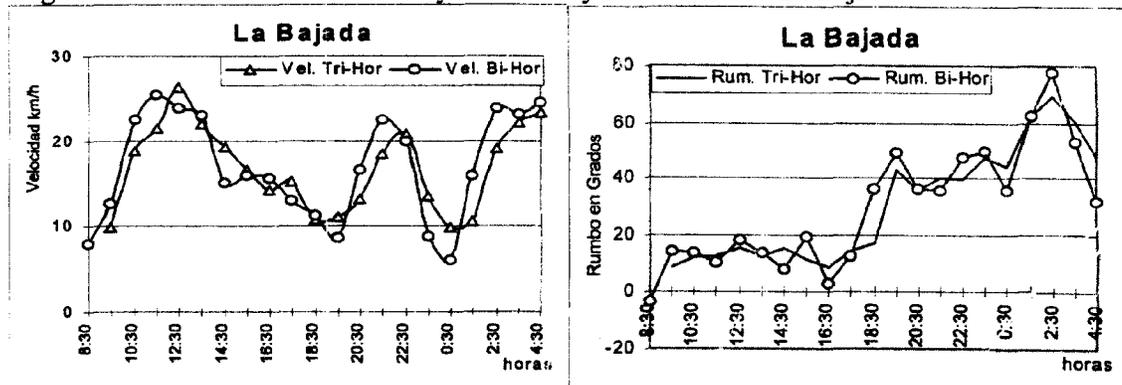
**El radar de Punta del Este** entra en servicio y reporta dos posiciones sucesivas del ojo a las 11:30 y 12:30 horas del día 18, localizándolo en los  $22^{\circ} 23' N$  y  $80^{\circ} 17' O$  y en los  $22^{\circ} 14' N$  y  $80^{\circ} 1' O$  respectivamente, confirmando la trayectoria en dirección hacia el Este, coincidente con las trayectorias de los datos digitalizados del radar de Casablanca y la óptima emitida por el INSTMET.

### RUMBO Y VELOCIDAD DEL OJO DEL CICLÓN.

Dos de los aspectos muy importantes en el seguimiento del ojo de un ciclón son: primero la determinación de su rumbo, para así conocer la dirección de su trayectoria y poder predecir el lugar por donde afectará. Segundo, la velocidad de traslación del ciclón en su conjunto, lo que permite conocer con anticipación la hora que afectará a la zona amenazada.

Con el objetivo de determinar el comportamiento del rumbo y velocidad del ojo del ciclón Lili, se calcularon ambos parámetros de las trayectorias estimadas por 3 de los radares occidentales, a intervalos horarios. El comportamiento de los rumbos horarios del ojo, muestran que su dirección es muy oscilante (trocoidal), ya que la variación del ángulo azimutal con relación al norte, cubre un diapasón desde  $-20^{\circ}$  hasta  $+80^{\circ}$ . Se concluye que, si se toma este rumbo horario para el pronóstico del movimiento futuro de la trayectoria, se cometerán continuamente errores. Por su parte la variación de la velocidad horaria de traslación, oscila desde 5 hasta más de 40 km./hora aleatoriamente. Resulta también difícil determinar la velocidad del ciclón en su conjunto mediante esta variable.

Figura 3. Gráficos de la Velocidad y Rumbo bi y tri-horarios de La Bajada.



Se decidió entonces calcular las velocidades vectoriales entre tres y cuatro puntos sucesivos observados de forma horaria, partiendo de la última posición estimada, hacia atrás. Si se toman cuatro puntos horarios sucesivos, el tiempo transcurrido es 3 horas, entonces le llamamos velocidad y rumbo tri-horarios. Para el caso de las velocidades y rumbos bi-horarios se procede de igual forma, pero a intervalos de 2 horas. Las velocidades y rumbos así obtenidos, se asocian a la hora de la última posición detectada por el radar.

Los gráficos de Rumbo y velocidad, bi y tri-horarios de las trayectorias obtenidas por los 3 radares siguen un patrón más ajustado a la velocidad y rumbo de traslación de todo el sistema en su conjunto y además muestran que, cuando la velocidad disminuye hasta su valor mínimo, ocurre un cambio de dirección de la trayectoria, dos o tres horas antes, según se determine en forma bi o tri horaria.

La secuencia de los gráficos de Rumbos bi-horarios entre LB y CB, muestran que el rumbo seguido por el ojo de Lili desde las 8:30 hasta las 18:30 del día 17 es de  $15^{\circ}$  a  $20^{\circ}$  N aproximadamente. Desde las 18:30 hasta la 2:30 del día 18 es de  $40^{\circ}$  N aproximadamente. En los datos digitalizados de CB, a las 2:54 del día 18 comienza a manifestarse un cambio de rumbo de la trayectoria que se estabiliza alrededor de los  $80^{\circ}$  (aproximadamente al Este), a partir de las 4:44 hasta las 11:41 horas del día 18, en que CB deja de ver la pared nubosa del ojo de Lili. Por otro lado la velocidad tri-horaria de PE presenta, como se dijo anteriormente, un mínimo de velocidad a la 2:30 horas del día 18, indicando un posible cambio de rumbo. Con estos dos conjuntos de datos, podemos decir que el cambio de rumbo de  $40^{\circ}$  a  $80^{\circ}$  se produjo entre la 2:30 y 3:00 horas del día 18 de Octubre de 1996.

En el caso de Lili vemos que a partir de las 13:30 del día 17, se observa que, entre el comienzo de la disminución de la velocidad, según la trayectoria determinada por LB Figura 3, hasta las 18:30 horas en que ocurre el mínimo de velocidad tri-horaria, hay un plazo de 5 horas, al restarle 3 horas, quedan 2 horas de plazo. El otro momento en que la trayectoria cambia de rumbo lo vemos en PE, cuando a partir de las 22:30 del día 17 comienza a disminuir la velocidad tri-horaria y su mínimo se detecta a la 2:30 horas del día 18, transcurriendo un intervalo de 4 horas, si se le restan 3 horas queda 1 hora de plazo aproximadamente.

Si se toman en consideración la velocidad bi y tri-horaria, existe la posibilidad de emplear un método objetivo de Pronóstico Inmediato por Radar, sobre el cambio de rumbo de la trayectoria de un ciclón en su conjunto. El plazo de anticipación dependerá de los intervalos temporales entre puntos de inflexión de la trayectoria seguida por el ojo del ciclón.

#### **DIFERENCIAS ENTRE LOCALIZACIONES DEL OJO, POR DIFERENTES RADARES.**

Existen dos tipos de errores posibles que se cometen por métodos radáricos al determinar la posición del centro del ojo causados por: 1) distancia o lejanía entre el radar y el ojo y 2) condiciones físicas presentes cuando se determina la localización del ojo. En el primer caso no se puede determinar la magnitud del error, ya que la Tierra es esférica, el volumen radárico de sondeo sobrepasa los niveles cercanos a la superficie terrestre y por tanto, el ojo en la altura no coincide verticalmente con el centro en superficie, debido al movimiento oscilatorio de las paredes. El segundo caso, en condiciones iguales (un mismo nivel de sondeo) y favorables (ojo bien formado y cerrado, y propagación similar del haz electromagnético), no debe existir diferencias entre las mediciones simultáneas de varios radares, a menos que el método subjetivo empleado en la localización del ojo no sea correcto. Cuando se trabaja en conjunto con varios radares, es importante que estas diferencias sean las menores posibles, para que la credibilidad de la información que se brinda sea mayor.

En la tabla 3 aparecen los errores en distancia de la posición del ojo, estimadas por las 4 estaciones de radar, en observaciones casi simultáneas. Como puede verse, PE es el que más observaciones simultáneas realizó junto con LB. A partir de las 21:30 horas aproximadamente del día 17, PSJ y CB realizan observaciones horarias casi simultáneas, pero solo están disponibles las tri-horarias. Desafortunadamente las observaciones de todos los radares no se tomaron en el mismo instante y existen diferencias de hasta 30 minutos.

En la tabla 3 se observa que, cuando PE hace su primera medición a las 12:00 horas del día 17, el error inicial es de 53 km., y a las 16:00 es de 38 km. aproximadamente con respecto a LB. Como es natural esta diferencia es muy grande. Todo parece indicar que se debe a errores en la medición realizada por PE a pesar de que LB se encuentra lejos del ojo.

Tabla 3. Distancia del radar y diferencias en las mediciones casi simultáneas de la posición del ojo entre cada uno de los radares.

La Bajada		Punta del Este		Dif.	Pico San Juan		Diferencia		Casablanca		Diferencia		
Dist	Hora	Dist	Hora	LB	Dist	Hora	LB	PE	Dist	Hora	LB	PE	PSJ
225	12:30	150	12:00	53									
210	13:30	125	14:00	37									
205	14:30	110	15:00	35									
196	15:30	80	16:00	38									
185	16:30	75	17:00	28									
185	17:30	70	18:00	16									
185	18:30	60	18:30										
190	19:30	45	19:30										
190	20:30	10	21:00	34	280	20:30		35	183	21:00	35'		34
200	21:30	7	21:30										
210	22:30	12	22:30										
210	23:30	30	0:00	32	250	23:30		22					
215	0:30	35	0:30						155	0:30			
235	1:30	45	1:30										
260	2:30	70	2:30		200	2:30			128	3:00	41	9	8
270	3:30	95	3:00	17					115	3:45	35	26	
285	4:30	110	4:00	17									
		110	5:00						150	5:30		38	
		130	5:00		142	5:30		19	157	6:00			18
									143	6:30			
									132	7:00			
					124	8:30							
		250	16:30		88	11:30		59					
		270	17:30										
					81	14:30							
					98	17:30							

Un punto interesante ocurre alrededor de las 20:30 horas, cuando el ojo se encontraba sobre PE. Resulta que la diferencia entre LB y PSJ es solo de 3 km., mientras que la diferencia relativa entre CB y PE es de 12 km. Sin embargo, el error entre CB y PE con relación a LB y PSJ es de 35 km., lo que puede deberse a la lejanía de estos dos radares. No obstante, todo parece indicar que fue un error de medición por parte de PSJ, pues este radar sondeaba en esta ocasión a una altura de 1.5 km. A partir de las 23:30 horas la diferencia relativa entre PE, PSJ y CB es menor a 26 km., aunque grandes con respecto a LB. Esto puede deberse a la lejanía de este último radar con relación al ojo del ciclón.

En la tabla 3 aparecen sombreados las diferencias en distancia de la posición del ojo, cuando los radares realizaron observaciones a la misma hora. Como se ve las diferencias no superan los 25 km. Solamente cuando el ojo observado por un radar se encuentra a una distancia mayor a los 200 km., es que la diferencia es mayor que 30 km. Esto, además del error propio de la medición, pudo deberse al movimiento oscilatorio e inclinado de las paredes nubosas alrededor del ojo mismo. Un ejemplo de esto nos lo muestran las observaciones a las 2:30 hechas por tres radares LB, PE y PSJ. Aunque este último se encuentra a 200 km. de distancia, debido a su altura de instalación puede medir en un nivel bajo (1.8 km.) y solo presenta una diferencia de 7 km. con respecto a PE, que se encuentra a solo 70 km. del ojo. Sin embargo, la diferencia de localización de LB es de 34 km. con relación a los otros dos radares, ya que se encuentra a 260 km. del ojo del ciclón y por tanto, su nivel de sondeo es de 4 km..

Por otro lado, tal como se muestran en la tabla 4, los valores promedio de diferencias en km. en todos los casos, sin tener en cuenta la distancia al radar, ni tampoco si la medición se hace a la misma hora, osciló entre 20 y 33 km. Se puede concluir que la diferencia media entre mediciones hechas por varios radares simultáneamente es aproximadamente de 30 km. Nótese que solamente las diferencias entre CB y LB son muy grandes (35 y 41 km.) debido a la lejanía del ojo con relación a LB, la cual es mayor a 200 km., además de no coincidir en tiempo ambas observaciones.

Tabla 4. Diferencias en distancia promedio entre mediciones de diferentes radares.

Estaciones	LB-PE	LB-PSJ	LB-CB	PE-PSJ	PE-CB	PSJ-CB
Diferencia Promedio (km.)	27	20	33	28	18	20

### CONCLUSIONES.

Los resultados expuestos confirman la utilidad, que representa contar con una red de radares meteorológicos convencional (No-Doppler) de longitud de onda de 10 cm., que cubra todo el territorio Nacional y sus mares adyacentes para la vigilancia contra la afectación de los ciclones tropicales. A la vez reafirma la necesidad de trabajar continuamente en mejorar la eficiencia del trabajo de dicha red. Se ha mostrado la utilidad de aplicar de forma automática a las imágenes digitalizadas el método de la espiral logarítmica. Además se plantea la posibilidad del uso de las velocidades bi y tri horarias, como un método de Pronóstico Inmediato por Radar objetivo de la trayectoria de un C.T.

### Bibliografía.

Report of the Seminar on the Application of Radar Data to Tropical Cyclone Forecasting. Tropical Cyclone Programme, Report No. TCP-19. WMO/TD - No. 26, 1985.

## SATELLITE AND AIRCRAFT OBSERVATIONS OF TROPICAL CYCLONES

*Patrick Hamill*  
*San Jose State University*  
*San Jose, California, USA*

*and*

*Henry B. Selkirk*  
*Space Physics Research Institute*  
*Sunnyvale, California, USA*

**RESUMEN:** Las características de ciclones tropicales fueron estudiados con aviones instrumentados durante el programa STEP (Stratospheric Tropospheric Exchange Program). Hemos considerado los resultados de ese estudio y los datos obtenidos de las observaciones de satélite del instrumento SAGE II (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II) para evaluar algunos aspectos de los procesos de intercambio troposférico-estratosférico. Consideraremos en algún detalle la posibilidad que ciclones tropicales son una fuente de la inyección de partículas sulfúricas en la estratósfera.

**ABSTRACT:** Characteristics of tropical cyclones were studied with instrumented aircraft during the Stratospheric Tropospheric Exchange Program (STEP). We have considered the results of that study as well as data obtained from satellite observations of the Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II (SAGE II) instrument to evaluate certain aspects of tropospheric-stratospheric exchange processes. We shall consider in some detail the possibility that tropical cyclones are a source for the injection of sulfate particles into the stratosphere.

### **Introduction**

A tropical cyclone is characterized by the large scale organized vertical transport of air. It has been suggested that this upward transport is the main source of tropospheric air entering the stratosphere. Any proposed mechanism for the injection of tropospheric air into the stratosphere must explain the fact that stratospheric air is extremely dry, having a relative humidity of less than one percent. (The water vapor mixing ratio in the lower stratosphere is in the range of 4 to 6 ppmv.) Photodissociation of methane is a high altitude source of water vapor, so the water vapor mixing ratio increases with height above the tropopause.

To explain the extraordinary aridity of the lower stratosphere, any tropospheric air entering the stratosphere must pass through a region of very cold temperatures. Water vapor in such an ascending air mass will condense and fall out, leaving the air highly depleted of water. The tropical tropopause is quite cold, and the tropics are generally associated with ascending air masses, so it is reasonable to assume that tropospheric air enters the stratosphere in the tropics. However, the "freeze drying" mechanism requires that air pass through regions where the temperature is about  $-90^{\circ}$  C or less. This is colder than temperatures normally encountered at the tropical tropopause or above tropical cyclones. However, as pointed out by Newell and Gould-Stewart (1981) the tropopause over Northern Australia, Indonesia and the western tropical Pacific during southern hemisphere summer is cold enough to achieve the required degree of freeze drying. This region and the ascending air masses that enter the stratosphere have been called the "stratospheric fountain."

### **The STEP Program**

The possibility that the western tropical Pacific is a region of significant stratospheric - tropospheric exchange was the subject of the NASA field campaign denoted "STEP - Tropical". The experiment utilized an instrumented ER-2 aircraft that was based in Darwin, Australia during the time period Jan 13, 1987 to Feb 15, 1987 and consisted of 13 flights.

Some of the principle results of the experiment were described in a special issue of the *Journal of Geophysical Research - Atmospheres* (Russell, Pfister and Selkirk, 1993). Suggested mechanisms for the injection of tropospheric air into the stratosphere that were addressed by the STEP experiment were regional scale forced ascent (as suggested by Newell and Gould-Stewart, 1985), forced ascent in deep mesoscale anvil cloud systems (Johnson and Kriete, 1982) and the injection of air into the stratosphere by overshooting cumulonimbus towers (Danielsen, 1982).

### **The SAGE II Satellite System**

SAGE II is a satellite borne sun photometer that measures solar intensity during each sunrise and sunset encountered by the satellite. As the sun sets (or rises), sunlight arriving at the instrument passes through successively lower regions of the atmosphere, until the sun is occulted by the ground or by clouds. The intensity of the radiation is measured at seven different wavelengths as a function of time, and the data are inverted to yield profiles for aerosol extinction, ozone, water vapor and nitrogen dioxide. The orbit of the satellite is such that twenty eight measurements are made each day. The measurements for sunsets (or rises) are separated by about 24 degrees in longitude and the latitude slowly varies from about 60 N to 60 S. Thus, the SAGE II observations form a rather sparse data set. However, the satellite has been operational since October 1984 and the large amount of data collected over its long lifetime make it an extremely useful tool for stratospheric climatologies.

### **The Stratospheric Aerosol**

Our interest in the stratospheric-tropospheric exchange is related to studies of the stratospheric aerosol layer. We have suggested (Hamill et al, 1997) that a source of stratospheric aerosol particles during non-volcanic periods (the so-called "background" aerosol layer) is the nucleation of sulfuric acid droplets in the upper tropical tropopause followed by injection into the stratosphere. This mechanism was postulated as the explanation for the large number of very small particles observed during a landing of the ER-2 at Fiji (Brock et al, 1995). It can be shown that the very cold temperatures near the tropical tropopause lead to large nucleation rates for sulfuric acid solution droplets. If such particles are transported into the stratosphere, they will coagulate with each other and with pre-existing particles. They will also grow by the mechanism of heteromolecular condensation in which water and sulfuric acid gases condense onto the droplets leading, finally, to the formation of a size distribution of about 10 particles per  $\text{cm}^3$  with a mode radius of about  $0.07\mu\text{m}$ . These particles will remain in the tropical stratospheric aerosol reservoir for most of their lives, but will eventually be transported to mid and high latitudes where they will be removed from the stratosphere through tropopause folds and other mechanisms.

### **Observations of Cyclone Irma**

During the STEP program, measurements were made over and near a number of tropical cyclones and other organized convective disturbances. One of these was Cyclone Irma on January 22. It was fortuitous that the SAGE II system carried out an observation of the stratospheric air roughly above the center of Irma on the same day. Simultaneously, the ER-2 carried out observations by flying in five constant altitude legs above and below the tropopause from Darwin to  $15^\circ\text{S}$ ,  $141^\circ\text{E}$ . The purpose of this particular flight was to investigate the outflow from Irma into the upper troposphere and lower stratosphere. Cyclone Irma was in a decaying state when these observations were made, as its center had moved over the Australian land mass.

### **Radon Measurements**

A measurement of radon concentrations during this flight (Kritz, 1993) showed radon to be present in measurable quantities up to 17 km altitude. This is a clear indication of the presence

of tropospheric air because the only source of atmospheric radon is the surface of earth and because radon has a half life of only 3.8 days. On this flight the measured water vapor mixing ratio was 2.8 ppmv (Russell et al., 1993).

### **Ozone Measurements**

The SAGE II measurements of ozone over Irma are distinctly different from those made on either side of the cyclone into clear tropospheric air, in that the ozone concentration just above the cloud level shows a larger value than that in non-cyclonic air. This observation suggests a sinking of stratospheric air. There are several possible explanations for the increase in ozone concentrations immediately above the cloud shield of the tropical cyclone; the most probable is that it is due to the divergence of tropospheric air at higher altitudes. Continuity arguments then indicate that the air in the lower stratosphere will descend towards the tropopause.

### **Water Vapor Measurements**

Unfortunately, the SAGE II water vapor measurement over cyclone Irma only go down to 20.5 km, so we do not obtain any interesting information from this profile. However, as mentioned above, the ER-2 measurements show that on this day the water vapor over the outflow of Irma was 2.8 ppmv, an extremely low value.

### **Measurements of Particulates**

Finally, we consider the measurements of particulates made by SAGE II and by the ER-2 instruments. The SAGE II instrument measures particulate extinction at four different wavelengths, 1020 nm, 525nm, 453 nm, and 385 nm. The ratios of the extinctions at these wavelengths were analyzed to see if any trend towards small particle sizes could be detected. The wavelengths of the SAGE II instrument are too large to allow for the detection of very small particles, however, the ER-2 data measurements of particulates indicated a large number of very small particles (Knollenberg et al., 1993). This strongly suggests the formation of new sulfate particles in the upper troposphere. These particles are then carried into the stratosphere by the exchange processes above the tropical cyclone. We suggest that this is the principle source of new particulates in the stratosphere during volcanically quiescent periods.

### **References**

Brock, C. A., P. Hamill, J. C. Wilson, H. H. Jonsson and K. R. Chan (1995): Particle formation in the upper troposphere: A source of nuclei for the stratospheric aerosol. *Science*, **270**, 1650-1653

Danielsen, E. F. (1982): A dehydration mechanism for the stratosphere, *Geophys. Res. Lett.*, **9**, 605-608.

Danielsen, E. F (1993): In situ evidence of a rapid, vertical irreversible transport of lower tropospheric air into the lower tropical stratosphere by convective cloud turrets and by larger scale upwelling in tropical cyclones, *J. Geophys. Res.* **98**, 8665-8682

Hamill, Patrick, Eric J. Jensen, Philip B. Russell, and Jill J. Bauman (1997): The life cycle of stratospheric aerosol particles. *Bull. Am. Met. Soc.*, **78**, 1395-1410

Johnson, R. H. and D. C. Kriete (1982): Thermodynamic and circulation characteristics of winter monsoon tropical mesoscale convection. *Mon. Weather. Rev.*, **110**, 1898-1911

Knollenberg, R. G., K. Kelly and J. C. Wilson (1993): Measurements of high number densities of ice crystals in the tops of tropical cumulonimbus, **J. Geophys. Res.**, **98**, 8639-8664

Kritz, Mark A., Stefan W. Rosner, Kenneth K. Kelly, Max Loewenstein, and K. Roland Chan (1993): Radon measurements in the lower tropical stratosphere: Evidence for rapid vertical transport and dehydration of tropospheric air, **J. Geophys. Res.**, **98**, 8725-8735

Newell, R. E. and S. Gould-Stewart (1981): A stratospheric fountain? **J. Atmos. Sci.**, **38**, 2789-2796

Russell, P. B., L. Pfister and H. B. Selkirk (1993): The tropical experiment of the stratosphere-troposphere exchange project: Science objectives, operations, and summary findings, **J. Geophys. Res.**, **98**, 8563-8590

Selkirk, Henry B. (1993): The tropopause cold trap in the Australian monsoon during STEP/AMEX 1987, **J. Geophys. Res.**, **98**, 8591-8610

## IMPACTO DEL HURACAN PAULINE DE 1997 EN LA COSTA DEL PACIFICO MEXICANO

Erik Sereno Trbaldo\* y Angel R. Meulenert Peña \*\*

\* El Ing. Erik Sereno Trbaldo es coordinador del Taller de Meteorología del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Campus Guadalajara.

\*\* El Dr. Ángel R. Meulenert Peña es profesor investigador del Instituto de Astronomía y Meteorología de la Universidad de Guadalajara

**RESUMEN:** Se presenta un análisis detallado de la evolución y desarrollo del huracán Pauline, 16avo. ciclón tropical de la temporada ciclónica de 1997 en el Océano Pacífico oriental. También se estudian las causas que influyeron en el impacto que provocó este sistema tropical en algunas zonas densamente pobladas del sureste de la República Mexicana, y se concluye el importante papel que juega en esa área la estructura orográfica, como elemento influyente en la vida del ciclón tropical.

**ABSTRACT:** A detailed analysis on the evolution and development of Hurricane Pauline, which was the 16<sup>th</sup> Eastern Pacific tropical system of 1997, is presented. Besides, the causes that influenced the impact of this hurricane in some densely populated zones of southern Mexico, are studied. Finally, it is brought into conclusion the importance of the orographic structure in that area to the life of the tropical cyclone.

### *Historia Sinóptica*

La historia sinóptica del huracán Pauline se basa en el análisis de su trayectoria, figura 1, de las condiciones meteorológicas locales y globales, y de características orográficas que se presentaron en algún momento de su formación, evolución y disipación.

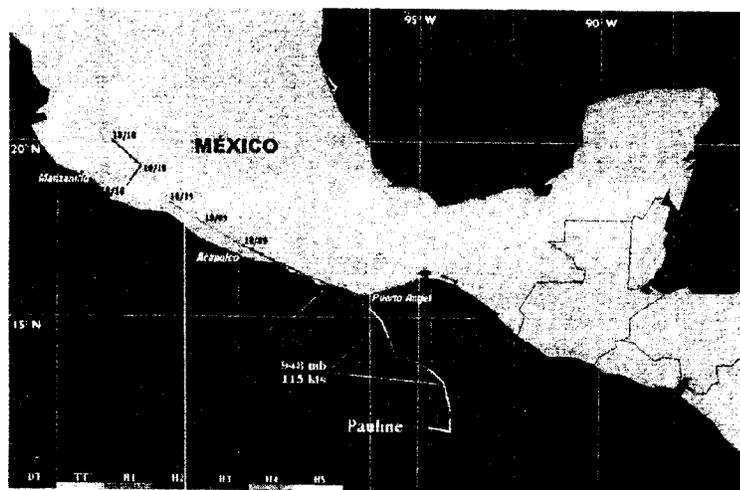


Figura 1. Trayectoria del Huracán Pauline, mostrando su ubicación y categoría diaria, además de la posición de intensidad máxima y de penetración a tierra. 6-10 de octubre de 1997.

El origen del disturbio inicial que propicia el surgimiento del huracán Pauline resulta bastante complejo y difícil de identificar, pero una detallada observación de la secuencia de imágenes del satélite desde el primero de octubre muestra, que Pauline, es el resultado de la interacción del extremo sur de una hondonada de bajas presiones de niveles medios, con una débil onda tropical, que surge...

Esta situación no es muy usual que ocurra y así lo indica Meulenert (1983) en su estudio sobre las condiciones sinópticas que intervienen en el surgimiento de los ciclones tropicales, no obstante, en la muestra estudiada se ilustra que algunos ciclones tropicales del Caribe y del Pacífico oriental se forman bajo las condiciones descritas.

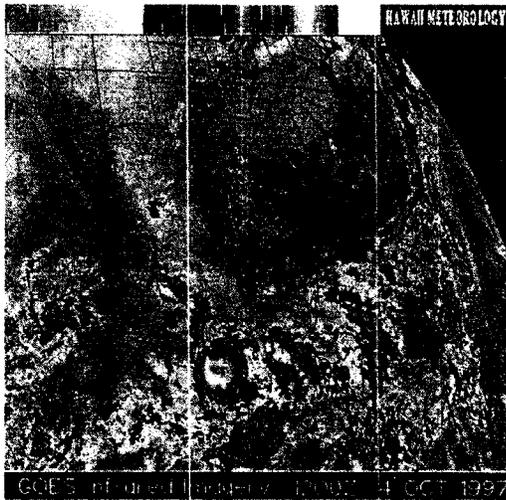


Figura 2. Origenes de Pauline 4 de octubre de 1997

La hondonada en cuestión produjo un desajuste en toda el área, de manera tal que las corrientes dominantes del aire en niveles bajos pasaron a dirección oeste, conjuntamente con un importante aporte baroclínico que favoreció desde el día 4 el desarrollo de una bien definida zona de actividad convectiva, como se muestra en la figura 2, y, por supuesto, con desplazamiento hacia el este. Para el día 5, se consolidó la circulación en los niveles bajos del sistema y a las 1200 UTC fue designada como la depresión tropical No. 18-E de la temporada en el Océano Pacífico Oriental, localizándose a aproximadamente 390 kilómetros al sur de Puerto Ángel, Oaxaca, México, con vientos máximos de 55 km/h y rachas de 75 km/h y continuando con su desplazamiento hacia el este.

Debido a la débil cizalladura vertical de la componente zonal del viento en la zona y a la aparición de bandas convectivas alrededor de un centro nuboso pequeño y denso, el sistema gradualmente se intensificó hasta alcanzar la categoría de tormenta tropical, adquiriendo el nombre de Pauline, en la madrugada del día 6, con vientos máximos sostenidos de 75 km/h y rachas de 90 km/h, localizada a 395 kms al suroeste de Tapachula, Chiapas. Ese mismo día por la tarde, 07/0000 UTC, Pauline adquirió el grado de huracán, observándose, por primera vez, un incipiente ojo en las imágenes de satélite. En ese momento, el huracán se ubicaba a aproximadamente 335 kms al Suroeste de Tapachula, Chis. con vientos máximos de 120 km/h y rachas de 150 km/h. Pero unas pocas horas más tarde, se define perfectamente un pequeño ojo y el huracán alcanza mayor desarrollo e intensificación, favorecido por los altos valores de la temperatura superficial del mar en el área, figura 3 y las condiciones dinámicas de la atmósfera.

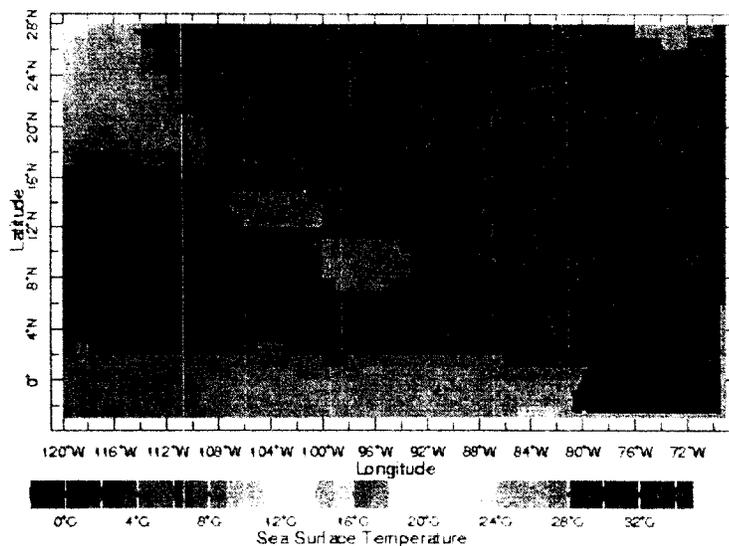


Figura 3. Temperatura Promedio Superficial del Mar del 4 al 8 de octubre de 1997

Mientras tanto, un fuerte sistema de alta presión establecido en el sureste de Estados Unidos, comenzaba a erosionar la hondonada situada en el sureste mexicano y por consiguiente, también a influir en el movimiento de Pauline. El huracán eventualmente giró hacia el noroeste y luego al nornoroeste durante el día 7, localizándose a las 1200 UTC a unos 275 kms al suroeste de Aquiles Serdán, Chiapas, con vientos máximos sostenidos de 215 km/h y rachas de 240 km/h, de manera que en ese momento alcanzaba su primer máximo de intensidad, ubicándolo en la categoría 4 en la escala de Saffir-Simpson. Al final de la tarde y noche Pauline se debilitó ligeramente hasta la categoría 3, con vientos máximos sostenidos de 185 km/h.

En la mañana del día 8, Pauline recuperó la categoría 4, alcanzando vientos máximos de 210 km/h y rachas de 260 km/h, con una presión mínima central estimada de 948 hPa, ubicándose a unos 100 kms al sursuroeste de Huatulco, Oaxaca. Hacia el mediodía, una buena parte del semicírculo derecho del sistema comenzó a interactuar con la costa y la zona montañosa del sureste mexicano, que en esta área alcanza alturas hasta 3,800 metros, resultando en la pérdida gradual de intensidad. Mientras, su desplazamiento lentamente se modificaba hacia el oestenoeste. Por la tarde, 09/0000 UTC, el ojo del huracán penetró a tierra a escasos 40 kms al oeste de Puerto Escondido, Oaxaca, con vientos máximos estimados de 180 km/h y rachas de 230 km/h, esto es, categoría 3.

Desde el momento de su entrada a tierra, y durante las siguientes 24 horas, Pauline mantuvo una trayectoria franca hacia el noroeste, precisamente paralela y a escasos kilómetros tierra adentro de la línea costera, mientras aceleraba su desplazamiento y disminuía en intensidad. A las 0900 UTC del día 9, su centro se localizó a tan sólo 30 kms al nornoroeste de Acapulco, Guerrero, con vientos máximos sostenidos de 120 km/h. En el transcurso del día, Pauline siguió avanzando sobre tierra, perdiendo rápidamente intensidad, pero conservando la organización y la convección central intensa. A las 1800 UTC, el centro del sistema fue localizado a 40 kms al norte de Zihuatanejo, con vientos máximos estimados en 90 km/h. Es importante destacar que los vientos máximos sostenidos estimados este día, estaban muy confinados a una pequeña zona cerca del centro, ya que en Acapulco, sólo se registraban 74 km/h en horas tempranas de la mañana.

Las imágenes de satélite recibidas en la mañana del día 9 mostraban una intensísima zona de nublados con un diámetro de unos 440 km sobre el estado de Guerrero y los topes brillantes con temperaturas más bajas que  $-75^{\circ}\text{C}$ , por lo que podían estimarse precipitaciones mayores a los 300 mm. Sobre este aspecto es importante tener en cuenta el efecto que produce la orografía del terreno en esa zona, ya que favorece el levantamiento violento del aire húmedo y por consecuencia la formación de grandes capas de nubes, aunque, por otra parte, contribuye al debilitamiento de los vientos horizontales del sistema. En el caso de Pauline fue el elemento lluvia el causante de las más grandes calamidades.

Al avanzar sobre la zona montañosa de Michoacán, Pauline se debilitó significativamente y a las 10/0000 UTC se localizó a 73 kms al nornoroeste de Lázaro Cárdenas, Michoacán, con vientos máximos estimados de 60 km/h y con un debilitamiento importante de su estructura nubosa. La tormenta tropical Pauline continuó moviéndose por la Depresión del Balsas, situada entre zonas montañosas y en la mañana del día 10, se degradó a depresión tropical, aproximadamente a 30 kms al suroeste de Uruapan, Michoacán, con vientos máximos sostenidos de 40 km/h y rachas de 65 km/h. Pauline se disipó poco después, a las 1200 UTC del día 10, en el estado de Jalisco,

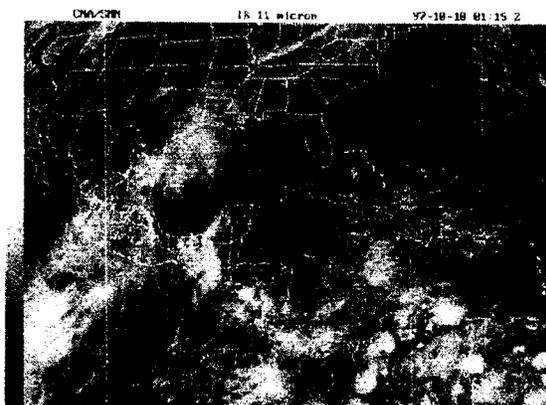


Figura 4. Disipación de Pauline 10 de octubre de 1997

cerca de Tuxpan y a 30 kms al sursuroeste de Guadalajara, como se puede ver en la figura 4. Es importante señalar que cuando un sistema tropical logra internarse en la Depresión del Balsas, planicie intramontana, cuya altura es menor de 200 metros sobre el nivel del mar, su desplazamiento futuro estará determinado por esta especie de canal que lo dirige hacia la porción sur del estado de Jalisco. Una situación similar ocurrió recientemente con el huracán Boris de 1995.

### *Efectos*

El huracán Pauline será recordado como uno de los más devastadores de México: ha sido el segundo más intenso huracán en golpear el estado de Guerrero, sobrepasado solamente por "Madeline" que se desarrolló entre el 28 de septiembre y el 8 de octubre de 1976, presentando en esa ocasión vientos máximos sostenidos de 232 km/h y penetrando a tierra en la región de Petacalco, Guerrero. Sin embargo, Pauline, debido a su gran fuerza, a su larga y anormal trayectoria sobre tierra, y a su paso por la densamente poblada ciudad de Acapulco, aunado a los insuficientes programas de alerta a la población sobre la entrada y magnitud del huracán, como fuera indicado por la Cámara de Diputados de la Nación (1997), lo han convertido en el segundo huracán más destructivo en la historia de México, sólo después del huracán Gilbert de septiembre de 1988.

Pauline se movió a lo largo de cientos de kilómetros de costa en el Pacífico Mexicano, desde su entrada a tierra cerca de Puerto Ángel, hasta su disipación en Michoacán y Jalisco. En su recorrido, afectó directamente a 5 estados del país: Chiapas, Oaxaca, Guerrero, Michoacán y Jalisco, e indirectamente con lluvias a Campeche, Tabasco, Veracruz, Puebla, Estado de México, Distrito Federal, Morelos, Colima y Nayarit.

El efecto más perjudicial del huracán fueron las lluvias torrenciales que enviaron torrentes de lodo y deslaves sobre muchas comunidades costeras, tanto de Oaxaca como de Guerrero. Las laderas montañosas que rodean a Acapulco fueron particularmente golpeadas por violentos y rápidos deslaves que provocaron grandes pérdidas humanas y materiales en ese puerto. Aquí es preciso indicar que muchos de los asentamientos humanos más golpeados se encontraban en zonas de alto riesgo. Los reportes de la prensa sitúan la cifra de decesos en más 230 personas y cientos de miles de damnificados.

Reuters reportó que la Cruz Roja Mexicana estimaba en 400 la cifra de muertos, sin embargo, esto ha sido negado por el gobierno mexicano. La revista Proceso (1997), señala que solamente en Guerrero se reportaron más de 150 muertos oficialmente reconocidos, más de 7,000 damnificados y por lo menos 200 desaparecidos. En Oaxaca, ante la falta de datos oficiales, diversos reportes de radioaficionados, corporaciones policiacas y cuerpos de rescate confirmaron la muerte de 70 personas, un sinnúmero de desaparecidos, 30,000 damnificados y 500 pueblos afectados. Ver Tabla 1.

**Tabla 1. Estimado Conservador del Total de Pérdidas Humanas**

Lugar	Pérdidas Humanas	Lugar	Pérdidas Humanas
Acapulco, Gro.	102	Tehuantepec, Oax.	24
Cuajinicuilapa, Gro.	5	San Agustín Loxicha, Oax.	14
Ometepec, Gro.	2	Coyantes, Oax	12
Chilpancingo, Gro.	1	Candelaria Loxicha, Oax.	4
Resto del Estado, Gro.	40	Santa María Colotepec, O.	4
Total Estado Guerrero	150	San Mateo Piñas, Oax.	3
		Resto del Estado Oaxaca	9
		Total Estado Oaxaca	70
<b>TOTAL (Estimado)</b>	<b>220</b>		

Fuente: Periódicos Nacionales de México (Público, Reforma, Ocho Columnas), National Hurricane Center de Miami, Revista Proceso No. 1093.

En cuanto a los daños materiales, se calcula que en Guerrero cinco mil casas fueron destruidas, otras 25,000 dañadas, 92 colonias afectadas en 14 municipios, 500 coches dañados, además de pérdidas materiales y de infraestructura incuantificables. Asimismo, la red telefónica y eléctrica resultó estropeada en varias regiones, las carreteras costeras fueron seriamente afectadas, la Autopista del Sol averiada por los deslaves y derrumbes, varios puentes de Oaxaca y Guerrero derrumbados y muchas poblaciones incomunicadas.

En lo que se refiere a la lluvia, "Pauline" propició una precipitación extraordinaria en Acapulco de 411.2 mm en 24 horas, que comparada con la máxima histórica de 384 mm, el 16 de junio de 1974, constituye un nuevo récord, de acuerdo con los registros del Servicio Meteorológico Nacional (1997). En la Tabla 2 se muestran totales de precipitación provocados por Pauline a su paso por tierras del sureste mexicano, National Hurricane Center (1997).

**Tabla 2. Totales de Precipitación en lugares selectos**

Lugar	Precipitación en mm	Lugar	Precipitación en mm
Acapulco, Gro.	411.5	Coyuca de Benitez, Gro.	208.3
Río Verde, Oax.	350.5	J. Del Marqués, Oax.	165.1
Las Vigas, Oax.	302.2	Las Pilas, Oax.	160.0
Juchitán, Oax.	231.1	Ixtepec, Oax.	160.0
Cruz Grande, Gro	231.1	Cuajinicuilapa, Gro.	127.0

Fuente: National Hurricane Center de Miami, Florida.

Aún cuando el área de la costa de Puerto Ángel pudiera haber sido golpeada por vientos de más de 213 km/h (115 nudos), no ha habido hasta el momento ningún reporte que describa específicamente el viento o el daño producido por la surgencia del mar, que probablemente hayan estado confinados a una zona escasamente poblada entre Puerto Ángel y Puerto

Escondido, Oax. Existen varios reportes de la prensa referentes a que Pauline produjo vientos sostenidos de 185 km/h y olas de 9 metros de altura en aldeas de pescadores al noroeste de Puerto Escondido en Oaxaca, que coinciden con la zona barrida por el cuadrante I del huracán, próximo a su ojo.

### *Datos Meteorológicos*

Observaciones Barcos			Observaciones Tierra				Estimado Satélite		
Fecha	Posición	Viento (km/h)	Fecha	Posición	Viento (km/h)	Rachas (km/h)	Fecha	Posición	Viento (km/h)
10/07 06Z	14.1N 92.7W	94	-	-	-	-	10/070 6Z	12.9N 94.2W	185
-	-	-	10/082 2Z	15.5N 97.1W	55	111	10/090 0Z	16.0N 97.6W	176
-	-	-	10/090 8Z	16.5N 99.55W	74	94	10/090 6Z	16.7N 99.0W	130

### *Conclusiones*

1. El huracán Pauline se originó a partir de una compleja interacción entre una hondonada casiestacionaria de bajas presiones en los niveles bajos y medios de la atmósfera, con una débil onda tropical.
2. El desarrollo explosivo de Pauline fue favorecido por los bajos valores de la cizalladura vertical de la componente zonal del viento y las altas temperaturas superficiales del mar en la zona donde se desplazaba.
3. La trayectoria hacia el este de Pauline, en sus primeros momentos de vida resultó inusual para la época del año, aunque al reorganizar su rumbo al cuarto cuadrante se comportó dentro de los límites normales.
4. La orografía del terreno, en esa área de la República Mexicana fue determinante en la evolución y desarrollo del sistema tropical, influyendo tanto en su trayectoria, como en su estructura.
5. La estela de destrucción y muerte que dejó Pauline a su paso por los estados de Oaxaca y Guerrero fueron ocasionados fundamentalmente por las intensas lluvias, que provocaron

inundaciones súbitas y deslaves importantes. Además, como factor humano se debe considerar la falta de un eficiente sistema de protección civil y la negligencia de algunas autoridades al permitir asentamientos humanos irregulares en zonas de alto riesgo.

### ***Referencias***

1. Cámara de Diputados de la Nación: Periódico Reforma. No. 1407, 15 de octubre de 1997, pág. 5A. Artículo "Califican de insuficiente la alerta sobre Paulina".
2. Meulenert, A.P. : "Surgimiento de los Ciclones Tropicales en el Atlántico Occidental y su pronóstico". Tesis de grado, Servicio Hidrometeorológico de la U.R.S.S., Moscú 1983. 174 pp. (en ruso).
3. Proceso: No. 1093, 12 de octubre de 1997, pág. 6. Artículo "Las autoridades ignoraron las advertencias sobre el peligro real de "Paulina" y no montaron a tiempo los operativos de alarma y protección".
4. Servicio Meteorológico Nacional de México, CNA: Reporte del huracán Pauline en Internet.

## RESULTADOS PRELIMINARES DEL MODELO BAROTROPICO SIMPLE APLICADO AL PRONOSTICO DE TRAYECTORIA DE HURACANES

*Enrique Azpra Romero*

*Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, Departamento Climatología,  
Física y Dinámica.*

**RESUMEN:** Se presenta un modelo barotrópico simple usado para el pronóstico de la trayectoria de ciclones tropicales. Los resultados inicialmente, muestran que en el nivel de 500 mb, el flujo dominante es del oeste, con lo cual no fue posible realizar adecuadamente los pronósticos de Pauline y Nora. Se propone realizar más experimentos en diferentes niveles de presión y establecer un vórtice idealizado para probar su desempeño y, en su caso, mejorar los resultados.

**ABSTRACT:** A simple barotropic model for tropical cyclones forecast is presented. Initially, results show that the dominant flow, in 500 mb level, is that from the west, for this reason, Nora and Pauline forecastings were not good. It is proposed to make more experiments in different pressure levels and design of an idealized vortex, in order to improve results.

### Introducción

En los últimos años, los destrozos ocasionada por la entrada de ciclones tropicales (tormentas o huracanes) a la República Mexicana, han sido cuantiosas tanto en lo económico como en lo humano.

Con el fin de apoyar los planes de protección civil, Buendía et al (1992) desarrollaron un modelo baroclínico filtrado que ha producido resultados alentadores en el pronóstico de la trayectoria de ciclones tropicales.

En el presente trabajo, se da un modelo Barotrópico simple que contribuya con esta tarea, dado que es útil tener más de un sólo modelo para la emisión de un pronóstico cuando la República Mexicana puede ser afectada por uno de estos fenómenos.

El modelo se refiere a considerar una atmósfera barotrópica filtrada en la cual la expresión final de la ecuación de vorticidad cuasigeostrofica tiene la forma (Buendía et al, 1984):

$$m^2 \frac{d\nabla^2 z}{dt} = - \left\{ \frac{g}{t} m^2 j(z, m^2 \nabla z) + m \frac{df}{\partial y} \frac{dz}{dx} \right\}$$

donde m representa el parámetro de escala de una proyección conforme a Lambert tangente de 30, z es la altura geopotencial de 500 mb, g es la aceleración de la gravedad, es es el parámetro de coriolis, t es el tiempo,  $\nabla$  es el operador laplaciano horizontal y j es el operador jacobiano.

La malla utilizada para la integración del modelo consta de la 19x22 puntos, la cual incluye la región IV meteorológica.

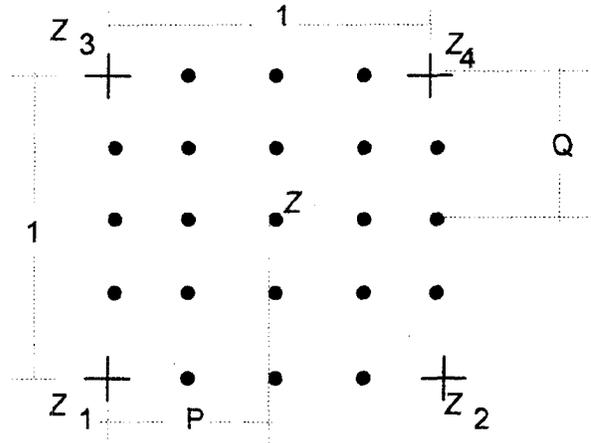
Usando los valores de alturas geopotenciales de esta malla burda (espaciados 432 kms), obtenidos de un análisis subjetivo, se realiza una interpolación por medio de una ecuación bilineal, para obtener una malla más fina (69 x 77) puntos con distancia entre puntos de malla

de 108 km. Los valores del geopotencial que definen el centro del ciclón tropical son analizados nuevamente a mano con la ayuda de las imágenes de satélite.

La función utilizada para obtener la malla fina es:

$$Z = (1 - P)(1 - Q)Z_1 + (1 - P)QZ_2 + PQZ_3 + P(1 - Q)Z_4$$

de acuerdo con la sig. figura:



Las condiciones de frontera hacia el norte y sur se refieren tanto a la altura geopotencial como función corriente constantes, para evitar el ruido producida por ellas. En las fronteras este-oeste se propone unir las cuñas de los océanos Pacífico y Atlántico haciendo que:

$$F(i,1) = F(i,21)$$

$$F(i,2) = F(i,22)$$

en la malla burda.

Se usan diferencias finitas centradas tanto espacialmente como temporalmente, excepto para el primer paso de tiempo, donde se usan diferencias adelantadas. El paso de tiempo es de 30 minutos. El operador Jacobiano es el de Arakawa (1966)

Resultados.

Para probar el desempeño de modelos se probó con los huracanes Nora y Pauline del año de 1997. En las siguientes figuras se puede apreciar que las trayectorias pronosticadas difieren bastantes de las trayectorias reales. En estos ejemplos se nota que la corriente del oeste es dominante, ya que la trayectoria pronosticada de estos huracanes se dirige rápidamente (menos de 24 h) hacia el este.



### Conclusiones

Es necesario realizar una cantidad más grande de casos para establecer si este modelo puede llegar a ser una ayuda efectiva para el meteorólogo.

Determinar si el nivel de 500 mb es el adecuado para describir el movimiento del huracán. Probar con 700 o 250 mb o inclusive promedios de capas (p. ej.: 1000-700, 1000-500 etc)

La efectividad de los resultados depende grandemente de la habilidad del meteorólogo, por lo tanto es necesario implementar el análisis objetivo para establecer las condiciones iniciales.

La efectividad del modelo es aquella que proporciona la ecuación de vorticidad barotrópica solamente.

### Referencias

- Arakawa, A. (1966). "Computational design for long term numerical integrations of the equations of fluid motion: two-dimensional incompressible flow. Part I". *J. Comp. Phys.* 1, pp. 193-213.
- Buendía, C. E., y Delgado, D. O. (1984). "Integración numérica del modelo baroclínico filtrado en la cuarta región", *Revista Geofísica IPGH*, Nos. 14-15, pp. 153-169.
- Buendía, C. E., Villicaña, C. F. J., Delgado, D. O., Valle, S. E., y Gómez A. F. (1992). "On the trajectory of cyclones likely to affect the Mexican Republic", *Atmósfera*, 5, pp. 21-30.

## **EJEMPLO DE INTERACCIÓN DE UN CICLÓN TROPICAL Y UN FRENTE FRÍO EN EL GOLFO DE MÉXICO EN 1995.**

*Geógrafa L. Guadalupe Matías Ramírez.*

*Instituto de Geografía, UNAM.*

*Apdo. Postal 20-850, 01000 México, D.F.*

**RESUMEN:** El huracán Roxana afectó a los estados del sureste de México del 11 al 20 de octubre de 1995, presentó una trayectoria inusual que ningún otro ciclón tropical había realizado desde hace 30 años; la presencia de un frente frío le impidió continuar su avance hacia el oeste, obligándolo a regresar a la Sonda de Campeche donde permaneció estacionario más de 48 horas lo que ocasionó importantes daños en las regiones costeras.

**ABSTRACT:** From October 11<sup>th</sup> to 20<sup>th</sup>, 1995 the Hurricane Roxanne affected all the states located in the southeast coast of Mexico; It presented an unusual trajectory that any tropical cyclone had not done since 30 years ago. A cold front stopped the way of the hurricane, forcing it come back to the Sonda of Campeche, Where it stayed in a stationary way for more than 48 hours; causing important damages in the coastal regions.

### **Análisis de la Trayectoria del Huracán Roxana.**

El único antecedente de los últimos 30 años, fue la tormenta tropical Inga en el centro del Golfo de México, la cual modificó su trayectoria a consecuencia de un frente frío que venía desplazándose del NW al SE sobre el estado de Tamaulipas, México, aunado a este la perturbación permaneció estacionaria durante 12 horas, mientras la intensidad de sus vientos descendían conforme retrocedía, una vez libre de este fenómeno la tormenta perdió intensidad y se desintegró finalmente frente al estado de Tabasco (Pardue, 1996).

Durante la temporada de huracanes de 1995, se formaron en el Océano Atlántico 21 tormentas tropicales, de las cuales 11 de ellas lograron desarrollarse como huracanes y de éstos últimos sólo 5 presentaron la categoría 3 (extremadamente peligroso) de acuerdo a la escala Saffir-Simpson.

De los 11 huracanes, Roxana fue el número 10 de esta temporada. Se obtuvieron los primeros reportes desde el día 7 de octubre cuando estaba cerca de las costas de Nicaragua. (Fig. 1). Empezó a afectar a la República Mexicana a partir del día 11, en este momento estaba cruzando la Península de Yucatán con vientos de 140 km/h, hasta internarse en la Sonda de Campeche con vientos máximos de 120 km/h y olas de hasta 4 metros de altura, en las siguientes 48 hrs. el huracán perdió intensidad y descendió a la categoría de tormenta tropical, se movió al oeste ubicándose a 130 km al N-NW de Frontera, Tabs. El día 16, sus vientos fueron de 185 km/h y rachas de 215 km/h. Posteriormente el meteoro descendió nuevamente a tormenta tropical al E-SE de Tampico, Tamps. Finalmente el 20 de octubre se degradó a una baja presión disipándose a 200 km. al este de Tuxpan, Veracruz (Douglas, 1996).

En la descripción sinóptica del meteoro se habla del comportamiento normal de las perturbaciones tropicales, es decir un movimiento hacia el oeste, sin embargo, en la segunda semana se presentó un movimiento extraño al S-SE, lo que provocó en la mayoría de los modelos de pronóstico problemas para conocer con exactitud su trayectoria (Fig. 2).

Según el Ingeniero Luna Bauza del Centro de Prevención del Golfo, el ciclón tropical detuvo su movimiento de traslación, al ser influenciado en su trayecto por una poderosa línea frontal que replegó hacia la Península de Florida, una vez que ocasionó vientos del "norte" en Tamaulipas y Veracruz. Por lo que se presentó un movimiento de retroceso ocasionado por el

frente frío No. 10, que se desplazó al S-SE afectando a los estados con litoral al Golfo de México.

Después del encuentro entre las masas de aire del ciclón tropical y el frente frío respectivamente, el primero retornó hacia el N-NW con lo cual recuperó la trayectoria normal de las tormentas tropicales (Vázquez, 1996) y el frente continuó su avance hacia el este hasta disiparse

### **Conclusiones.**

Es importante hacer notar que cuando alguna tormenta extratropical ha cruzado Norteamérica, su frente frío, ocasiona precipitaciones intensas, oleaje alto y fuertes vientos en la región del Golfo de México.

Así el huracán Roxana permaneció estacionario y luego retrocedió al coincidir con el avance del frente frío No. 10, que interactuó con las bandas nubosas del meteoro, y mostró una trayectoria errática. Debido a la larga permanencia del ciclón frente a los estados de Campeche, Yucatán, Tabasco y Veracruz, las pérdidas económicas sobrepasaron los 500 millones de pesos en las actividades agropecuarias y la industria PEMEX, perdió 27 millones de dólares en la producción de crudo, debido a la paralización de sus actividades en las plataformas de explotación. En pérdidas humanas ocurrieron 23 decesos y los damnificados sobrepasaron la cifra de un millón.

### **Referencias.**

Ahrens, D. (1991): *Meteorology Today. An introduction to weather, climate and environment*, 4 ed, West Publishing Company, U.S.A., pp. 576.

Douglas, L. (1996): "Hurricane hunters finish Record-Breaking 1995 hurricane Season", *National Weather Digest*, U.S.A, December, pp. 42.

Vázquez, A. (1995): "Porqué el Huracán Roxanne no entró a Veracruz", *Universidad de Veracruzana, Instituto de Ingeniería*, Diciembre, pp. 13.

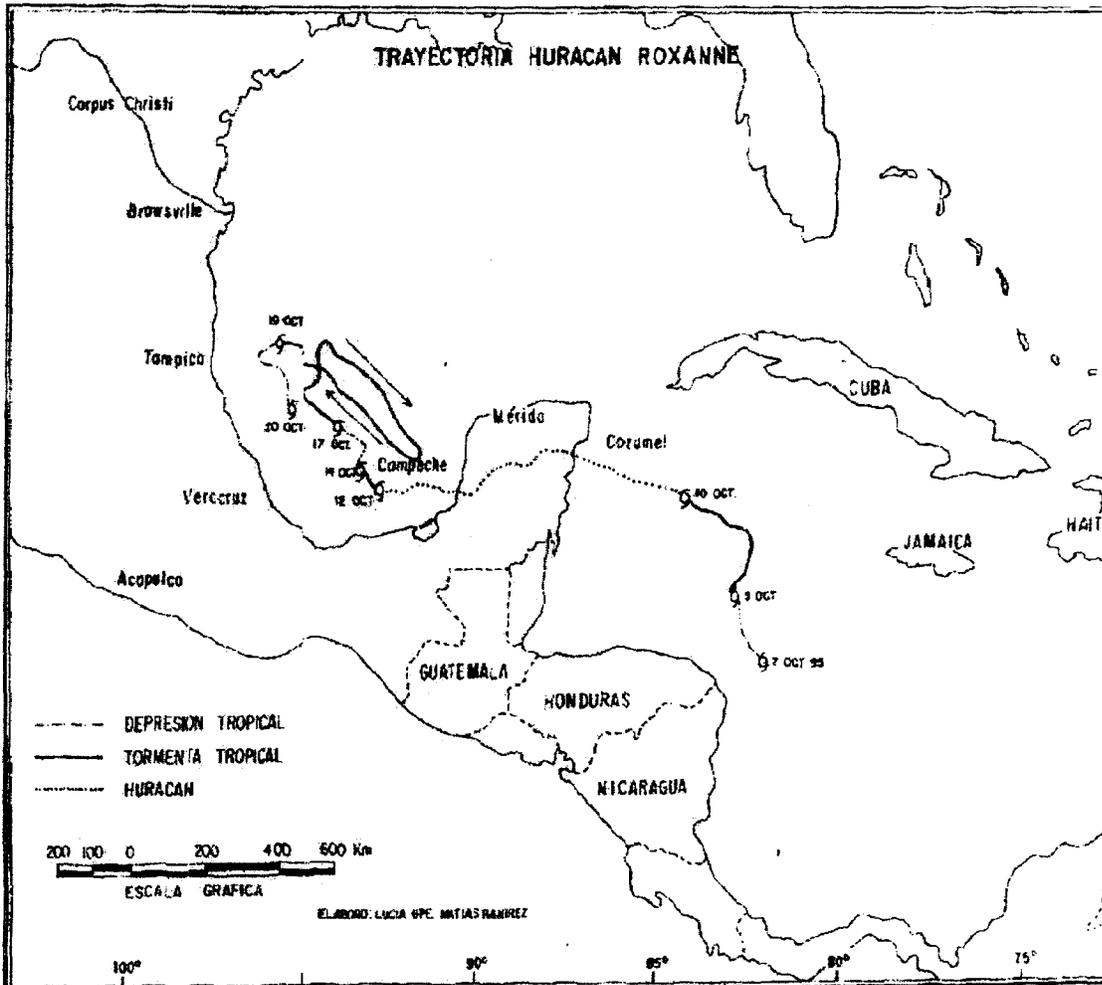


Figura 1. Avance y retroceso en la trayectoria del huracán Roxanne

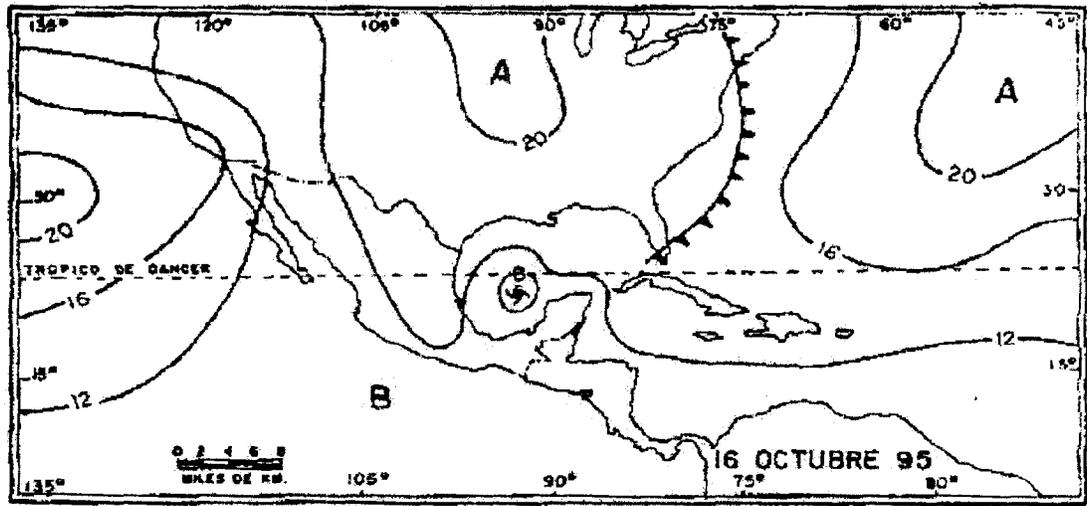


FIG. 2b FUENTE: CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMOSPHERA, UNAM, 1995, 12:00Z

## **Aplicación de métodos de cálculos espectrales del oleaje en el pronóstico a corto plazo de las penetraciones del mar por Ciclones Tropicales.**

*Y. Juantorena, P.L. Beauballet y Marina Sosa Hurtado  
Instituto de Meteorología.  
Cuba.*

**RESUMEN:** El cálculo de los elementos de olas en ciclones tropicales por métodos espectrales se empezó en Cuba en 1990 (Peñate, 1990) y se continuó posteriormente por los propios autores en 1996. En este trabajo se presenta una nueva versión, en la cual se analizan los campos de olas y vientos de cada ciclón y la propagación posterior de la energía de la componente espectral en diferentes direcciones a partir de las áreas generadoras de mayor afectación para Cuba. Para validar los resultados se utilizaron valores reportados por las boyas de las que se recibe información del Golfo de México y de los barcos que navegaban por la zona o cerca de esta.

**ABSTRACT:** The calculation of wave elements in tropical cyclones by spectral methods began in 1990 by Peñate (1990) in Cuba, it and was continued from 1996 by the authors of this paper. A study of wind and wave fields in a tropical cyclone and the energy propagation of spectral component in different directions from generating wave zone, is presented in this paper. For validation of these results, obtained by spectral methods, we used the observations of Gulf of Mexico buoys and ship's reports.

### **Introducción**

Determinar el campo de ola dentro del área de acción de los ciclones tropicales resulta de gran interés para la predicción de desastres costeros y navales, es por eso que se necesita de un método de operatividad en tiempo real y que brinde la descripción del campo de ola en toda el área afectada por el ciclón, estas dos cualidades implican que el pronosticador al aplicar el método obtenga un máximo de información con el mínimo empleo de tiempo.

Para realizar el estudio se analizan los ciclones tropicales que produjeron penetraciones del mar en el Malecón habanero desde 1970 hasta la fecha, se utilizó para esto la cronología de penetraciones de Pérez et al (1994) y posterior a esta fecha se usaron las recopilaciones de los propios autores. Los valores observados de los parámetros de las olas en el Malecón durante las situaciones ocurridas en el período de análisis se obtuvieron de Mitrani et al (1994).

Para la validación de los resultados de los métodos aplicados se utilizaron los datos de las boyas del Golfo de México.

### **Materiales y Métodos**

En el mecanismo de propagación intervienen varios procesos que disipan la energía de las olas; estos son la dispersión angular y longitudinal, la presencia de vientos secundarios fuera de la zona de generación que no sólo disipan, sino que también aumentan la energía de las olas y, por último, se analizan los procesos de propagación en diferentes direcciones con respecto al eje central.

Según como aparece en OMM ( 1988,1997), la dispersión angular ( $D_a$ ) se debe al hecho de que al dejar el área generadora cada componente espectral continua desplazándose con su propia dirección; para el cálculo de este proceso se emplea la fórmula obtenida en Juantorena y Beauballet (1996) que depende de la distancia del área generadora hacia el punto de predicción ( $R_p$ ) y del ancho del frente de generación ( $AB$ ):

$$D_a = 0.04 + 1.2 \text{Exp}\left(-\frac{R_p}{2AB}\right) - 3.3 \text{Exp}\left(-\frac{R_p}{AB}\right) + 6.2 \text{Exp}\left(-\frac{2R_p}{3AB}\right) - 3.08 \text{Exp}\left(-\frac{2R_p}{AB}\right) \quad (1)$$

La dispersión longitudinal ( $D_l$ ) se debe a la diferencia de velocidades de grupo entre las diversas componentes del espectro, acordándose que todas se analizan en una misma dirección.

Para el cálculo de este proceso se utiliza la fórmula:

$$D_l = \frac{\text{energía de la componente espectral}}{\text{energía total del espectro}} \quad (2)$$

Para el cálculo de ambas energías se tendrá en cuenta que el espectro bidimensional de las olas en función de la frecuencia y de la dirección en el rango de saturación, o sea, cuando la entrada del viento desde la atmósfera se hace mayor que las interacciones no lineales entre las olas, se comporta como un espectro de JONSWAP ( Hasselmann S., 1973). El cálculo de la dispersión longitudinal se realiza para las componentes que viajan en una misma dirección, entonces podemos despreocupar la dirección en el espectro bidimensional y obtendríamos un espectro de frecuencias unidimensional cuya expresión analítica es la siguiente:

$$E_j = \frac{g^2 \alpha * f^2}{(2\pi)^4} \text{Exp}\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{f}{f_m}\right)^4\right] * \text{Exp}\left\{\ln \gamma \left[\frac{(f - f_m)^2}{2\sigma^2 f_m^2}\right]\right\} \quad (3)$$

donde,  $f_m$  es el pico de frecuencias del espectro,  $\alpha$  es el parámetro de Phillips que describe el crecimiento de  $f$  para las altas frecuencias del espectro,  $\gamma$  es el factor de crecimiento entre el pico de JONSWAP y el de Pierson - Moskowitz y  $\sigma$  es el ancho del pico.

Una vez definida la expresión a utilizar, la energía de la componente espectral en el intervalo de tiempo se obtiene integrando a través del Método de Simpson para integrales numéricas, en el intervalo de frecuencias de las componentes comprendidas en ese tiempo, y la energía total se calcula de igual manera, pero en el intervalo del ancho de frecuencias totales del espectro de JONSWAP.

Para el cálculo de la frecuencia pico del espectro partimos de una altura espectral ya conocida, la cual es la salida del programa CTCORVAR realizado por Peñate y Torres en 1987, brinda el campo de olas del espectro de Pierson - Moskowitz y la expresión a utilizar es :

$$f_m = 0.148 \times H_{m0}^{-0.6} \times V_{10}^{0.2} \quad (4)$$

Para el factor de ensanchamiento del pico utilizamos el valor 3.0 propuesto por Günther et al (1981).

La interacción entre el viento secundario y la distancia de propagación se muestra a través de la expresión:

$$D_e = R_p \times \left[ 1 - \frac{U \cos \theta}{C} \right] \text{ (empleada por el Centro Meteorológico de Santander, 1994) (5)}$$

donde  $D_e$  es la distancia efectiva,  $R_p$  es la distancia de propagación del mar de leva,  $C$  es la velocidad de fase de la ola y  $U \cos \theta$  es la componente del viento secundario.

**Resultados**

Los métodos CTCORVAR y CLEMAR1 ( Juantorena y Beauballet, 1996) se aplicaron a una muestra de 7 ciclones tropicales en distintos estadios de desarrollo y con características diferentes, es decir con diferencias en la velocidad de traslación y en el radio de vientos máximos.

Cuando se aplica el programa CTCORVAR obtenemos los campos de olas y vientos en las siguientes matrices ( Fig 1).

a

b

**Fig1.Campos de olas (a) y vientos (b) en un ciclón tropical (Huracán Opal, 4/10/95 0600z)**

El centro de la matriz coincide con el centro del ciclón y el eje de coordenadas coincide con la dirección del movimiento, además en cada salida del programa aparece una escala en

Sector delantero														
0	0	0	0	0	3	3	4	4	4	4	4	0	0	0
0	0	0	3	3	4	4	5	5	5	5	5	4	0	0
0	0	3	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	0	0
0	0	4	4	4	5	5	5	5	6	6	6	6	5	0
0	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6	6	6	6	0
0	4	4	4	4	5	5	6	6	7	7	8	6	6	0
0	4	4	4	4	4	5	5	7	7	7	7	6	6	0
3	4	4	4	4	4	5	4	6	7	7	7	6	6	6
0	3	4	4	4	4	4	5	7	7	7	7	6	6	0
0	3	3	4	4	4	5	6	6	6	6	6	6	6	0
0	3	3	4	4	4	5	5	6	6	6	6	6	5	0
0	0	3	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	0	0
0	0	3	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5	0	0
0	0	0	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5	0	0
0	0	0	0	0	4	4	5	5	5	5	5	0	0	0
Sector trasero														

0	0	0	0	0	14	15	15	16	16	16	0	0	0	0
0	0	0	13	14	15	16	16	17	17	17	16	0	0	0
0	0	13	14	15	16	17	17	18	18	18	17	17	0	0
0	0	13	14	15	17	18	19	20	20	19	19	18	0	0
0	13	14	15	16	18	20	21	23	23	22	21	20	19	18
0	13	14	15	17	19	21	24	26	26	24	22	21	19	18
0	13	14	15	17	19	22	28	32	30	26	24	21	20	18
12	13	14	15	17	19	23	25	30	32	27	24	22	20	17
0	13	14	15	17	19	22	28	32	30	26	24	21	20	18
0	13	14	15	17	19	21	24	26	26	24	22	21	19	18
0	13	14	15	16	18	20	21	23	23	22	21	20	19	18
0	0	13	14	15	17	18	19	20	20	19	19	18	0	0
0	0	13	14	15	16	17	18	18	18	18	17	17	0	0
0	0	0	13	14	15	16	18	18	17	17	17	16	0	0
0	0	0	0	0	14	15	15	16	16	16	0	0	0	0

kilómetros y millas náuticas para poder

comprender mejor los resultados.

Después de obtener el campo de olas en el área generadora se calcula la propagación en la dirección central ( la misma dirección del viento) y en las distintas direcciones ( 15, 30 y 45 grados con respecto a la dirección del viento); además se determina la altura de la ola en el punto de predicción para distintos períodos de pronóstico. En las tablas I y II se muestran las salidas del método CLEMAR1 aplicado al Huracán Opal (4/10/95, 0600).

Tabla I: Altura de la ola en la dirección central de propagación.

Tiempo de llegada ( Horas)	Altura de la ola (m)
24	1.5
30	2.5
36	2.3
42	1.8
48	1.3
54	0.8

Tabla II: Altura de la ola en diferentes direcciones de propagación.

Dirección	Alt. (24)	Alt. (30)	Alt. (36)	Alt. (42)	Alt (48)	Alt. ( 54)
0 grados	1.5	2.5	2.3	1.8	1.3	0.8
15 grados	1.4	2.2	2.0	1.6	1.2	0.7
30 grados	1.1	1.8	1.6	1.3	0.8	0.6
45 grados	0.7	1.2	1.1	0.9	0.6	0.4

Este mismo estudio que se realizó al Huracán Opal se le aplicó a una muestra de 7 ciclones tropicales en todos su días de afectación y se compararon los resultados con las observaciones de las boyas y de los barcos. Para el caso de mar profundo y para el caso de mar poco profundo ( Malecón habanero) se utilizaron los datos visuales. Con todos estos resultados se conformó la siguiente tabla III.

Tabla III. Comparación de los resultados en mar abierto y mar poco profundo.

C.T	Fecha/hora	Alt. Cal. (m) mar profundo	Alt. Obs. en mar profundo	Atl. Cal ( m) Malecón	Alt. Obs. en Malecón
Eloise	22.10.75 (18z)	S.T.I 7.0	5.0	4.0	3.0 a 5.0
Eloise	23.10.75 (00z)	S.D.D 8.0 S.T.I 7.0	7.0 6.5	4.2	3.0 a 5.0
Eloise	23.10.75 (12z)	S.T.D 8.0 S.T.I 5.0	7.0 7.0	4.8	3.0 a 5.0
Kate	18.11.85 (12z)	S.D.D 5.0	3.5	5.0	más de 5.0
Kate	19.11.85 (00z)	S.D.D 6.0	4.0	4.5	5.0
Kate	20.11.85 (12z)	S.D.I 3.0 S.D.D 5.0	3.5 3.5	5.0	más de 5.0
Floyd	11.10.87 (12z)	S.T.D 4 a 5-5	4.5	5.5	más de 5.0
Floyd	12.10.87 (00z)	S.D.I 3.0 S.D.D 5.0 S.T.D 4.0 5.0	2,5 a 4.0 4.0 3.5 3.0	4.0	más de 5.0
Floyd	12.10.87 (12z)	S.D.I 3.0	3.5	4.0	5.0
Floyd	12.10.87 (18z)	S.D.I 3.0	2.5	5.0	5.0
Gordon	14.11.94 (00z)	S.D.D 3.0	1.5	3.0	3.0 a 5.0
Gordon	14.11.94 (12z)	S.D.D 3.0	2.0	3.0	3.5
Gordon	14.11.94 (18z)	S.D.D 4.0	2.5	4.0	3.0 a 3.5
Gordon	15.11.94 (12z)	S.D.D 3.0	3.5	3.0	3.0 a 3.5
Opal	4.10.95 (00z)	S.D.D 6.0 5.0 S.D.I 4.0	6.0 2.5 5.0	3.5	3.0 a 4.0

Opal	4.10.95 (12z)	S.T.I 6.0	7.0	2.8	3.0 a 4.0
		S.D.I 4.0	3.0		
Opal	4.10.95 (18z)	S.D.D 6.0	4.5	3.2	3.0 a 4.0
		S.T.D 6.0	3.5		
		S.T.I 4.0	4.0		
Josephine	7.10.96 (12z)	S.D.D 3.0	4.0	0.85	1.0
		S.T.D 4.0	3.0		
		S.T.I 2.0	5.5		
Josephine	7.10.96 (18z)	S.D.D 4.0	4.0	2.5	3.0
		S.T.D 3.0	2.5		
		S.T.I 2.0	4.5		
Josephine	8.10.96 (06z)	S.T.D 3.0	3.5	3.0	3.0
		S.T.I 2.0	4.5		
		1.0	1.5		
		2.0	2.5		

donde: S.D.D es el sector delantero derecho del ciclón.

S.T.D es el sector trasero derecho del ciclón.

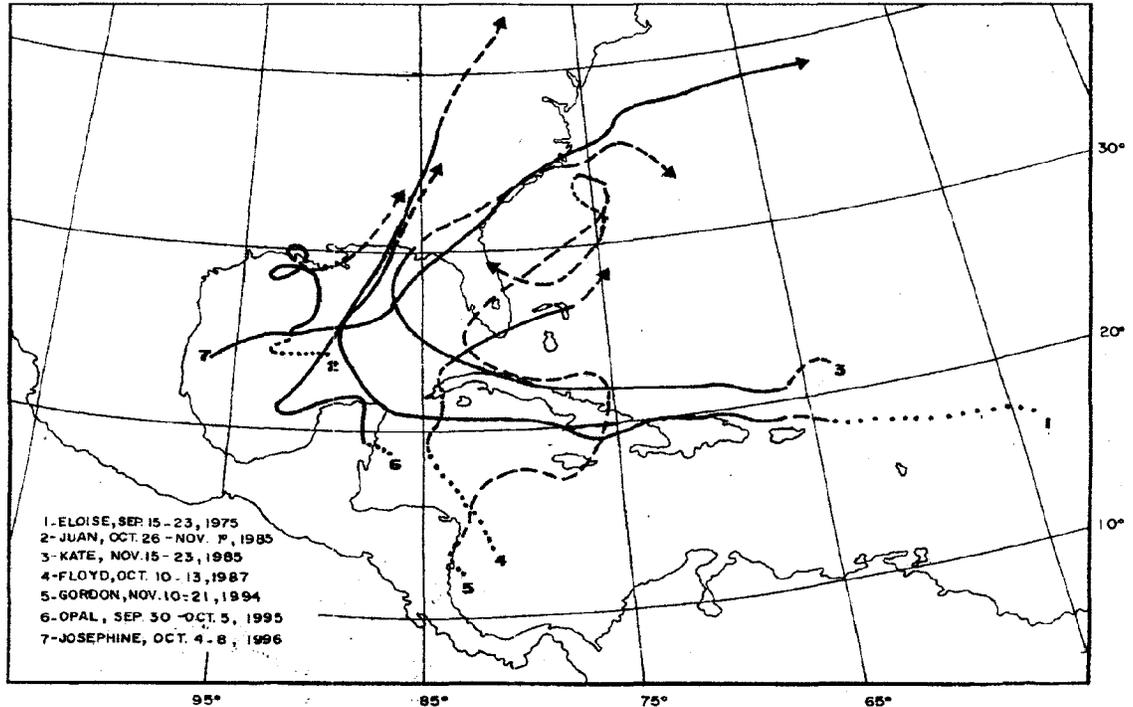
S.D.I es el sector delantero izquierdo de ciclón.

S.T.I es el sector trasero izquierdo del ciclón.

En la tabla III falta el ciclón tropical Juan que aunque se realizaron los cálculos no se pudieron comprobar pues no aparecen los mapas de archivo del Departamento de Meteorología Marina. De los resultados obtenidos podemos decir que las olas que llegaron al Malecón tenían una altura de 4 a 5 metros. El factor que más influyó en que la penetración fuera tan fuerte fue la persistencia de los vientos huracanados en el NW del Golfo de México, los cuales estuvieron afectando desde el 28 hasta el 31 octubre, otro factor determinante fue el wave set up que alcanzó un valor de 0.7 m.

A pesar de que no todos los horarios pudieron ser comprobados por falta de datos observados, se calcularon los errores del método de pronóstico y se obtuvo que es de 1.15 metros de altura al aplicar ( CTCORVAR) y de 0.88 metros para el cálculo de la propagación (CLEMARI).

A continuación en la figura 2 se presentan las trayectorias seguidas por los ciclones tropicales escogidos para confeccionar la muestra estudiada.



**Figura 2. Trayectoria de los ciclones tropicales escogidos.**

### Conclusiones y Recomendaciones

En este trabajo se aplicó un método para el pronóstico a corto plazo del campo de olas y vientos en un ciclón tropical (CTCORVAR) y se calculó además la propagación de las olas (CLEMAR1) para determinar su afectación en el Malecón habanero. Este cálculo se aplicó a los ciclones que produjeron penetraciones y se obtuvo un error medio de 1.15 m para el CTCORVAR y 0.88 m para el CLEMAR1. Los errores son permisibles para el fin con que fue diseñado, pero está claro que no es lo más ideal pues CTCORVAR es un método que no considera la propagación de las olas ni tiene los efectos de disipación, y además, considera que el oleaje es completamente desarrollado, por lo que tampoco tiene en cuenta el mecanismo de generación desde sus etapas de inicio. El CLEMAR1 sólo es válido para métodos donde se analiza la propagación de un punto a otro consecutivo y no en una malla completa, por lo que no considera la propagación desde distintos puntos próximos al que se estudia ni se considera la propagación desde éste hacia otros que no sea continuo.

Por lo anteriormente planteado, se recomienda elaborar un modelo de generación de oleaje para la Región IV que represente el estado de la superficie marina a través de un espectro bidimensional que brinde información de la altura de las olas, el período y la dirección media. Este modelo debe incluir un mecanismo de crecimiento y disipación de las olas y un mecanismo de propagación bien definido, además, recomendamos acoplar el modelo con un modelo de circulación atmosférica para obtener el campo de viento lo más riguroso posible.

Se recomienda aplicar este método en el Departamento de Pronóstico Marino del Instituto de Meteorología.

## Referencias

Archivo de mapas del INSMET, (1919 - 1997).

Centro Meteorológico de Santander (1994): Predicción del oleaje y estado del mar.

Günther H., W. Rosenthal, M. Dunckel, (1981): The response of surface waves to changing wind direction. Jour. Oceanogr., VII, 718:728 pp.

Hasselmann S., (1973): Measurements of wind wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP), Dtsch. Hydrogr. Z., A8, 95 pp.

Juantorena Y. y P. Beauballet, (1996): Método de cálculo para la predicción del mar de leva. Boletín Virtual de SOMETCUBA. Vol.2, No.2.

Mitrani I., R. Parrado, R. Vega, L. Díaz, I. Salas, A. del Sol, R. Caslas, P. Osorio. (1994): Características hidrometeorológicas generales de la zona costera correspondiente al Malecón habanero. Informe final de resultado científico. INSMET. 45 pp.

OMM, (1988): Guía para el análisis y pronóstico de las olas, No 702.

OMM, (1997): Guía para el análisis y pronóstico de las olas No 702.

Peñate A., (1990): Desarrollo de un método objetivo de diagnóstico y pronóstico del campo de ola en los mares adyacentes a Cuba Tesis de Doctorado. 136 pp.

Pérez O., A. del Sol, L. Díaz, R. Vega, R. Caslas. (1994): Análisis Hidrometeorológico y estadístico de las penetraciones del mar en el Malecón habanero. Instituto de Meteorología, CITMA. ( Inédito).

## **INFLUENCIA DE LOS CICLONES TROPICALES EN EL RÉGIMEN DE OLEAJES PELIGROSOS DEL LITORAL HABANERO.**

*Ida Mitrani Arenal, Rafael Pérez Parrado  
Instituto de Meteorología, a.p. 17032, Casablanca, La Habana, c. p. 11700*

**RESUMEN:** Se describen las particularidades de la influencia de los ciclones tropicales en el régimen de oleaje extremo para el litoral de la ciudad de La Habana. Se presenta una serie temporal de penetraciones del mar ocurridas en esta zona desde 1919 hasta 1994. Se analizan las posibles causas del aumento en los daños producidos por las penetraciones, registradas en dicha serie desde 1975. Se incluye el régimen de mareas de tormenta. Para el diseño obras hidrotécnicas de alta confiabilidad, se recomienda utilizar series temporales con la mayor longitud que permita la información disponible en archivo.

**ABSTRACT:** Particularities of the tropical cyclone influence in the wind wave extremal regime for Havana shore zone are described. A temporal series of coastal flooding in Havana City is presented. The possible causes of damage increase by coastal floodings from 1975, are analyzed. The storm surge regime is included. For the design of highly reliable hydrotechnical constructions it is advisable to use as long time series as possible according to the available information.

### **INTRODUCCION**

La zona costera correspondiente al Malecón Habanero, se caracteriza por presentar pendientes abruptas y esto favorece en gran medida a las inundaciones por oleaje. Se asocian habitualmente con la afectación de los sistemas frontales, por ser estos eventos los más frecuentes. Sin embargo, los cálculos de los elementos de ola dan valores mayores para los huracanes que han afectado la zona, los cuales se acompañan de vientos más intensos; además, la sobreelevación del nivel del mar por oleaje se combina con la marea de tormenta generada por estos eventos.

En los archivos del Instituto de Meteorología (INSMET), se conservan datos meteorológicos asentados en mapas sinópticos desde 1919 hasta el presente, que tradicionalmente han servido para la determinación de oleajes extremos en la zona. Es difícil asegurar la exactitud de los métodos aplicados, debido a la ausencia de registros instrumentales de los elementos de ola, pero siempre es conveniente lograr una visión del régimen de olas aunque esta sea a partir de los cálculos numéricos.

En el presente trabajo, se pretende mostrar las particularidades de la influencia de los ciclones tropicales en el régimen de oleaje extremo en aguas profundas, en la sobreelevación del nivel del mar al paso de los ciclones tropicales y su enlace con las penetraciones del mar en el Litoral Habanero, así como las probables causas del aumento de los daños materiales en los últimos 30 años, causados por penetraciones del mar.

### **LOS CICLONES TROPICALES EN EL RÉGIMEN DE OLA LITORAL HABANERO.**

Para el diseño de la obras de protección del Malecón Habanero, se emprendió un estudio integral de esta zona costera. Los resultados obtenidos se reflejan en el informe presentado por Mitrani et

al. (1994). Los materiales informativos utilizados en este trabajo, fueron tomados del Archivo de Mapas del INSMET y abarcaron el período de tiempo comprendido entre 1919 y 1993. También se estudió la información dada por Ortíz (1984) para el siglo pasado.

Se determinó que los ciclones tropicales capaces de afectar a las costas cubanas por oleaje, son los que se originan y/o atraviesan la región comprendida entre los 10° y 25° N y entre los 65° y 90° W. Hasta la temporada de 1993, se contabilizaron 325 casos. A la cuadrícula de 2,5° X 2,5° le corresponden 43 casos que afectaron a La Habana por oleaje (Figura 1).

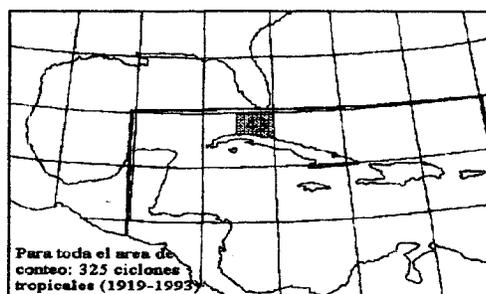


Figura 1. Área de conteo de los ciclones tropicales que pudieron afectar a las costas de Cuba por oleaje en el periodo de estudio.

Es válido aclarar que durante el período analizado, se registró como evento atípico al huracán "Juan" (caso V en la Figura 2), el cual se originó justo en la frontera occidental de la zona de estudio. Ocasionó los mayores daños cuando su centro se hallaba en las cercanías de la desembocadura del río Mississippi, con algunas características de baja extratropical. El área de generación del oleaje se extendió desde la zona central del Golfo de México hasta las costas americanas, con predominio de vientos del noroeste.

En la muestra analizada, al menos siete casos de ciclones tropicales produjeron penetraciones del mar. Su afectación depende de la combinación de los siguientes factores: A) Tipo de trayectoria que describan. B) Velocidad de traslación C) Velocidad de sus vientos. En la Figura 2 se representan las trayectorias que tuvieron estos organismos, tomadas de los archivos del INSMET. Los casos (I, III, VI) presentan trayectorias paralelas a la costa, mientras que los casos (II, VII) atravesaron la isla. En los casos (I, IV, V), la afectación fundamental la produjo el mar de leva. En los casos (II, III, VI, VII), las penetraciones se produjeron por mar de viento con influencia de la sobre elevación del nivel del mar por surgencias.

Según el "Manual de Vigilancia Meteorológica Nacional" (INSMET 1993), se definen los términos de "Penetraciones ligeras", cuando hay bajos niveles de inundación que dificultan el tránsito por vías costeras y "Penetraciones con inundaciones costeras", cuando hay niveles de inundación con mayor o menor intensidad. Con éstas definiciones se corresponden los términos de penetraciones "débiles" (alturas de ola significativa de más de 2,5 m y menos de 4m) para el primer concepto y de "moderadas" (de 4 a 5 m) o "severas" (más de 5 m) para el segundo, propuestos por Pérez et al. 1994 para el trabajo operativo del INSMET.

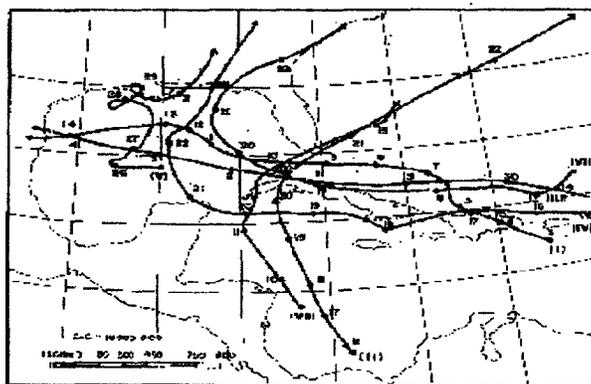


Figura 2. Trayectorias de los ciclones tropicales que produjeron penetraciones del mar en el litoral la ciudad de La Habana.

Por testimonios de prensa, recopilados en el Centro de Documentación del Poder Popular de la Habana (Torrens, 1993), se identificaron al menos 20 casos de penetraciones del mar notables, desde 1919 hasta marzo de 1994. Estos se relacionan en la Tabla 1, añadiéndose la clasificación acorde con los criterios de Pérez et al.(1994) y los cálculos de la altura de ola significativa, realizados por Mitrani et al.(1994) aplicando las metodologías recomendadas en los manuales de GOSTROI (1976; 1983) para aguas profundas.

Tabla 1. Penetraciones del mar en el Malecón Habanero (1919-1994), registradas en la prensa.

FECHA	TIPO DE FENOMENO	CLASIFICACIÓN
9-9-19	(I) HURACAN	SEVERA
20-10-26	(II) HURACAN	SEVERA
2-9-33	(III) HURACAN	SEVERA
3-3-42	SISTEMA FRONTAL	SEVERA
27-2-52	SISTEMA FRONTAL	SEVERA
2-1-58	SISTEMA FRONTAL	SEVERA
23-9-75	(IV)HURACAN "ELOISE"	SEVERA
19-1-77	SISTEMA FRONTAL	SEVERA
3-3-80	SISTEMA FRONTAL	MODERADA
6-11-82	SISTEMA FRONTAL	MODERADA
17-3-83	SISTEMA FRONTAL	SEVERA
28-2-84	SISTEMA FRONTAL	MODERADA
28-10-85	(V) HURACAN "JUAN"	SEVERA
19-11-85	(VI) HURACAN "KATE"	MODERADA
5-1-87	SISTEMA FRONTAL	SEVERA
12-10-87	(VII) HURACAN "FLOYD"	SEVERA
12-4-88	SISTEMA FRONTAL	MODERADA
6-2-92	SISTEMA FRONTAL	SEVERA
13-3-93	SISTEMA FRONTAL	SEVERA
2-3-94	SISTEMA FRONTAL	MODERADA

Es necesario destacar una particularidad que presenta la Tabla 1: En los primeros 56 años (1919-1975) se tienen testimonios de seis eventos muy significativos, mientras que en los segundos 35 años (1975-1994, incluido el año 75), se conoce de hasta 14 casos, entre moderados y severos. Los cálculos realizados en el primer intervalo, indican que en la prensa se reflejaban sólo los eventos "severos". Por otras parte, ha habido un aumento en la ocurrencia de fenómenos muy peligrosos, tanto por huracanes como por sistemas frontales, aunque es más notable para los segundos. Cabría preguntarse si está presente la influencia de los cambios climáticos previstos.

Pudiera existir algún tipo de enlace entre el aumento de la intensidad y frecuencia de las penetraciones del mar al paso de los sistemas frontales y las variaciones de la temperatura planetaria. Por ejemplo, en las tendencias de la temperatura planetaria desde finales del siglo pasado (WMO 1996), se señala un predominio de anomalías negativas hasta 1975; después esta tendencia es positiva y así se mantiene hasta el presente. Se ha podido detectar un calentamiento en aguas del Atlántico, en las cercanías del paralelo 24° (WMO, 1998). Además, en investigaciones realizadas por Pérez Parrado et al., 1995 se muestra la existencia de un enlace entre la intensidad de las inundaciones ocasionadas por sistemas frontales, con la ocurrencia del evento ENOS

Sin embargo, no se tienen suficientes argumentos para afirmar que esto haya ocurrido así en lo referido a los ciclones tropicales (Mitrani et al. 1994) y esto se reafirma en los estudios climatológicos más recientes, elaborados por los especialistas del INSMET (Ballester et al. 1997). Para el contenido de la Tabla 1, entre las posibles explicaciones pudieran ser las siguientes:

A) La información localizada para la primera mitad del siglo está incompleta.

B) Se ha intensificado la influencia de los factores meteorológicos

C) En la primera mitad del siglo, sólo se producían grandes daños al paso de los eventos clasificados como "severos". La magnitud de los daños ha ido aumentando con el tiempo, incluyendo la influencia de las penetraciones moderadas. Por tal motivo, las inundaciones costeras por penetraciones del mar han ganado una mayor atención de la prensa.

La tercera explicación se basa en la intervención de los factores antrópicos: Mayor densidad de población en la zona, aumento de la urbanización, prolongación de la longitud del muro durante el siglo, mal estado de la red de drenaje, deformaciones artificiales del fondo marino etc. De ahí deduce que el aumento de los daños sufridos en las últimas décadas por la Ciudad de La Habana, debido a las penetraciones del mar, no sólo están presentes los factores meteorológicos, sino también las acciones realizadas por el hombre en la mencionada zona costera.

Como particularidad de la influencia de los huracanes en el régimen de ola, correspondientes al Litoral Habanero, se destaca que los oleajes generados por los mismos son generalmente de alta peligrosidad. De catorce penetraciones severas ocurridas en 75 años, al menos seis fueron producidas por ciclones tropicales.

En la Tabla 2 se reflejan los valores de los elementos de ola obtenidos para estos eventos por las metodologías recomendadas en GOSTROI (1976; 1983). En los casos en que ha sido posible, se incluyen observaciones visuales del estado de la superficie marina realizados por especialistas del Departamento de Meteorología Marina del INSMET, desde zona costera. De los resultados obtenidos, se puede notar una correspondencia aceptable entre las observaciones visuales y los cálculos realizados. Los mayores oleajes producidos por huracanes, corresponden a la primera mitad del siglo, con alturas significativas por encima de los seis metros.

Tabla 2. Elementos de ola en aguas profundas, para los ciclones tropicales que han producido penetraciones del mar en el Malecón de la Habana.

CASOS	FECHA	$H_{MED}$ [m]	$H_{SIG}$ [m]	$H_{SIG OBS}$ [m]
I	9-919	4.8	7.63	-
II	20-10-26	4.2	6.67	-
III	2-9-33	4.7	7.2	-
IV	23-9-75	4.23	6.6	4 - 6
V	28-10-85	3.56	5.56	4 - 6
VI	19-11-85	3.55	5.64	3 - 5
VII	12-10-87	3.75	5.71	4 - 6

Donde:

$H_{MED}$  [m]- Altura media de la ola en metros;

$H_{SIG}$  [m] - Altura significativa de la ola en metros

$H_{SIG OBS}$  [m] - Altura significativa observada de la ola en metros

Además de la muestra analizada, se tiene un valioso testimonio acerca de la intensidad que puede alcanzar un huracán a su paso por La Habana en el trabajo de Ortíz (1984). Se refiere al huracán más intenso de que se tiene noticia haya afectado la ciudad. Fue registrado el 11 de octubre de 1846, con una presión mínima central de 916 hPa. Tomando como presión periférica los 1010 hPa, se estima que a su paso por la ciudad presentó una velocidad máxima de 79.72 m/s, con racha máxima de 88.61 m/s. Por el método de Pérez Parrado (1974), se estimó una sobre elevación del nivel del mar de hasta 4m.

Lo anterior se corresponde muy bien con un aspecto de particular interés señalado por Ballester et al (1997): entre 1910 y 1944, ocurrieron 9 de los 10 huracanes de gran intensidad que han afectado al territorio nacional en el presente siglo y esta situación es semejante a lo sucedido durante el período 1844-1888, en el cual se formaron 5 de los 6 más intensos registrados en el pasado siglo.

Por otra parte, en la bibliografía consultada se destaca que en el período 1890-1991 se observa una tendencia al aumento de la ciclogénesis en aguas del Atlántico, al mismo tiempo que una disminución en los mares Interamericanos, lo cual se corresponde con las variaciones atmosféricas y oceánicas detectadas, así como también con la presencia del evento ENOS (Ballester et al. 1997). Sin embargo, en la muestra de eventos severos analizada para el presente trabajo, se puede apreciar una disminución en la intensidad de los oleajes generados por los huracanes en el litoral de Ciudad Habana, pero no en la frecuencia de afectación, la cual aumenta ligeramente para la etapa posterior a 1975.

Si bien es cierto que los ciclones tropicales no constituyen un evento de tan alta frecuencia como los sistemas frontales en zona costera correspondiente al Malecón Habanero, ellos generan grandes oleajes, que pueden ir acompañados de la marea de tormenta, por lo que su influencia es decisiva en el régimen de ola para períodos de retorno de más de diez años. Para obras hidrotécnicas que requieran un amplio margen de seguridad, es aconsejable tomar una serie temporal de información meteorológica lo más larga posible, hasta donde lo permitan las disponibilidades de información de archivo. Pudiera ocurrir que una serie corta no incluya suficientes casos de ciclones tropicales de gran intensidad. De producirse en la actualidad un evento de la magnitud de los de principios de siglo, los daños serían incalculables.

## LAS MAREAS DE TORMENTA EN EL LITORAL HABANERO

A los oleajes que se generan por vientos huracanados, se añade la influencia de las mareas de tormenta, las cuales pueden producir sobreelevaciones del mar de alguna consideración en la zona de estudio. Este fenómeno se valoró en el trabajo de Mitrani et al. (1994), aplicando el método de Pérez Parrado(1974). En el método se toma en cuenta la diferencia de presión entre la periferia y el centro del ciclón tropical, el ángulo con que este penetra en tierra, su velocidad de traslación y la distancia a la cual se halla la isobata de 20 m con respecto a la costa. El efecto de la marea astronómica se añade por suma directa. El cálculo del régimen de la sobreelevación se elaboró en dependencia de las diferentes intensidades y para un radio de 100 Km, centrado en la Ciudad de la Habana. Como base de datos, se tomó el Sistema de Información Estadística (SIE) (García y Beauballet, 1992), donde se recoge la información sobre los ciclones tropicales para más de 100 años en nuestra región. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Período de retorno para las distintas elevaciones del nivel del mar en La Habana producidas por mareas de tormenta.

Frecuencia (caso/años)	$\delta h$ (m)
1/10	1.0
1/20	1.9
1/50	2.6
1/75	3.0
1/100	3.3
1/200	4.0
1/500	4.7

Estos datos se deben utilizar como una aproximación, puesto que no existen registros instrumentales que permitan su comprobación precisa.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la zona costera correspondiente al Malecón Habanero, los ciclones tropicales juegan un importante papel en el régimen extremo de los elementos de ola, al ser los responsables de siete penetraciones del mar intensas en el período de estudio (1919-1994), con olas de alturas significativas por encima de los 5 metros. Casi la mitad de las penetraciones del mar "severas" que se conocen en el presente siglo, han ocurrido al paso de los ciclones tropicales.

Los cálculos realizados, muestran que los ciclones tropicales que afectaron a La Habana por penetraciones del mar en la primera mitad del siglo, fueron más intensos que los de la segunda mitad, con oleajes por encima de los siete metros. A esto se añade la sobreelevación del nivel del mar por mareas de tormenta. Se recomienda que para la construcción de obras costeras que requieran un amplio margen de seguridad, se procesen series temporales de eventos meteorológicos tan largas como lo permita la información disponible. Una serie corta, pudiera no incluir la suficiente cantidad de ciclones tropicales.

La causa del aumento de los daños sufridos en la ciudad de La Habana por penetraciones del mar, en las últimas tres décadas puede residir en el incremento de la acción de dos factores: la actividad antrópica, estrechamente ligada al aumento de la urbanización y la influencia de los

factores meteorológicos. Se recomienda que para cualquier acción de manejo costero en la zona, las investigaciones deberán apoyarse en el estudio integral de ambos aspectos.

## BIBLIOGRAFIA

-Archivo de Mapas del INSMET (1919-1994)

- Ballester M., C. González , M. Limia, R. Pérez (1997) "Los ciclones Tropicales" Cap. 5 del informe "Variaciones y cambios del clima en Cuba" (Inédito), Centro Nacional del Clima, INSMET, La Habana, 54 pág.

-García A., P. Beauballet (1992) "Sistema de Información Estadística sobre Ciclones Tropicales" (Sistema para computadoras personales IBM - compatibles) INSMET, ACC

-GOSTROI (1976) "Carga y efecto sobre las construcciones hidrotécnicas." (En ruso), SNIP-II-57-75. Stroizdat, Moscú, 60 pág.

-GOSTROI (1983) "Carga y efecto sobre las construcciones hidrotécnicas." (En ruso), SNIP-2.06.04-82, Stroizdat, Moscú, 37 pág.

- INSMET (1993) "Manual de la Vigilancia Meteorológica Nacional" (Inédito) ACC, Circular Interna No. 3, La Habana, 127 pág.

-Mitrani I., R. Pérez Parrado, R. Vega , L. Díaz , I. Salas ., A. Del Sol, R. Casals, P. J. Pérez , O. Barreras (1994) " "Características hidrometeorológicas generales de la zona costera correspondiente al Malecón Habanero" Informe Final de Resultado Científico (Inédito), INSMET, 50 pág.

-Ortiz R. (1984) "Consideraciones sobre el huracán más intenso que se tiene noticia haya afectado a Cuba, a la luz de algunos conocimientos actuales (Octubre 11 de 1946)" (Inédito); presentado en el I Seminario - Taller de Desastres Naturales, INSMET, ACC, 22 pág.

-Pérez J., R. Casals, A. Del Sol, L. Díaz, R.Vega (1994) "Análisis estadístico e hidrometeorológico de las penetraciones del mar ocurridas en el Malecón Habanero" (Inédito) Material de archivo del Dpto. Meteorología Marina del INSMET.

-Pérez Parrado R. (1974) "Método de pronóstico de la marea máxima en los huracanes" (Inédito), INSMET, ACC, 10 pág.

- Pérez Parrado R., J. Rego, O. García (1995) "Efectos del evento ENOS durante la temporada invernal en Cuba" Boletín SOMETCUBA (publicación electrónica, vol. 1, No. 2, La Habana

-Torrens R. M. (1993) "Base de datos bibliográficos acerca de las penetraciones del mar en el litoral habanero" Archivos del Poder Popular de la ciudad de La Habana.

-WMO (1996) "WMO statement on the status on the Global Climate in 1995" WMO No. 838, Geneva , Switzerland, 11 Pág.

-WMO (1998) "The ocean and the climate" World Climate News No.12, Geneva , Switzerland, 12 Pág.

## PROBABLES CAUSAS DE ERRORES EN EL PRONOSTICO DE LA TRAYECTORIA DE LOS CICLONES TROPICALES EN LA REPUBLICA MEXICANA

*Orlando Delgado D.*

*Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México.  
Depto. Climatología Física y Dinámica.*

**RESUMEN:** Mediante el modelo baroclínico de dos parámetros se realizan pronósticos de la trayectoria de los ciclones tropicales en el C.C.A de la UNAM desde finales de la década de los 80's hasta el presente, sin embargo aún existen errores, una fuente de error se produce cuando los sistemas de gran escala se mueven rápidamente ya sea por las condiciones reales ó por que el modelo las acelera bruscamente, cambiando bruscamente la dirección de movimiento del huracán. Otra de las causas de error en el pronóstico de la trayectoria de los ciclones tropicales se producen cuando dos vórtices se encuentran bajo la influencia del efecto Fujiwhara (Fujiwhara 1921, M. Lander y G. Holland 1992). Un caso fue detectado en el océano pacífico nor-oriental cerca de las costas de Michoacán, México, en junio de 1996 cuando el Huracán Alma interactuó con un sistema convectivo de mesoescala (SCM). El pronóstico lo ubicó muy cerca de la ciudad Lázaro Cárdenas Mich. pero un análisis detallado de las imágenes de satélite muestra que Alma no tocó tierra si no que fue el vórtice de mesoescala que al entrar en interacción binaria con Alma entra a tierra. En las corridas del modelo baroclínico puede apreciarse ampliamente esta interacción binaria, tal y como la describe Holland. Esto nos obliga a seguir usando el modelo para explicar otros casos similares que han pasado y que pasarán, tanto en las costas mexicanas del océano pacífico como del golfo de México.

**ABSTRACT:** Through the baroclinic model of two parameter are performed forecastings of the tropical cyclones trajectory in the C.C.A of UNAM from the end of the 80th's up to the present time, obtaining good results, an error source it is produced when the systems of big scale move fast already be by the real conditions or by the accelerated model and changing the motion direction of the hurricane. Another cause of error in the forecasting of the tropical cyclones trajectory are produced due to that there exist two vortex under the influence of the Fujiwhara effect (Fujiwhara 1921, M. Lander and G. Holland 1992). A detected case in the nor-east Pacific Ocean near Michoacan shores, Mexico, in June 1996 when hurricane Alma inter acted with a cyclone vortex of mesoscale. The forecasting situated it very near from the city of Lazaro Cardenas Michoacan, but a very deep analysis of the satellite images show that Alma did not landed but the mesoscale vortex that when started the binary inter action with alma then landed. In the run of the baroclinic model can be seen widely this binary inter action, such as it is described by Holland. This obliged us to follow using the model to explain other similar cases that has happened and will go on happening, so in the East Pacific Ocean shores as in the Gulf of Mexico.

### INTRODUCCIÓN.

El pronóstico de la trayectoria de los ciclones tropicales es un tema de gran interés, a la fecha los modelos usados para pronosticar su trayectoria se han desarrollado enormemente pero aun se tienen errores que se deben principalmente a la falta de datos, que transmiten incertidumbres al ubicar las corrientes en las que se mueve el huracán y así obtener incertidumbres en el pronóstico de la trayectoria. Otra fuente de error es la presencia de dos huracanes que interactúan entre si bajo la influencia del denominado efecto Fujiwhara (1921, 1923) en el cual el movimiento que describen los dos sistemas ciclónicos es de una circulación en el sentido contrario de las manecillas del reloj de los dos vértices alrededor de un centro común seguido de la fusión de ambos sistemas en este centro.

Debido a que en la realidad, pocos sistemas binarios siguen el modelo dado por Fujiwhara, M. Lander y G. Holland (1993) propusieron un modelo de interacción binaria basado en estudios estadísticos del comportamiento de ciclones binarios realizados por Dong y Newman (1983).

Este modelo describe una fase de captura seguido por una atracción mutua de los dos vórtices, posteriormente entran en fase de giro ciclónico alrededor de un centro común y finalmente un escape o bien la fusión de los dos sistemas.

En este estudio se identifica una interacción binaria entre el huracán Alma y un sistema convectivo de meso-escala que se dio lugar al sur de la República Mexicana entre el 21 y 23 de junio de 1996. Y se muestra el movimiento que sigue el par binario mediante el modelo baroclínico de dos parámetros Holton (1989). El modelo reproduce acertadamente el movimiento de los dos vórtices que forman este sistema binario. Y se muestra que las precipitaciones registradas el día 22 de Junio, en Michoacán México, se debieron a la entrada a tierra del sistema convectivo de meso-escala que interaccionó con el huracán Alma.

#### LA INTERACCION BINARIA.

En la imágenes satelitarias de los días 20, 21 y 22 de junio de 1996 se pueden observar los dos sistemas tropicales que interactúan entre sí, el día 20 el huracán Alma se encontraba aproximadamente a 250 Km. al sureste de Acapulco, Guerrero, mientras que el segundo vórtice se encontraba más al Sur justamente en Zona Intertropical de Convergencia (11 N 96 O) separados aproximadamente 480 Km. El centro de los vórtices se calcula según (Dvorak 1994).

El día 21 a las 18:00 Z se observa que la distancia de separación ha disminuido considerablemente por lo cual se puede decir que están en la fase de atracción mutua.

A las 00:45 Z del 22 de Junio, la distancia entre los dos vórtices es de aproximadamente 160 Km. por lo cual se deduce que continúa la atracción mutua. A las 006:15 Z de este mismo día, el sistema ciclónico de meso-escala (SCM) se encuentra a la misma latitud que el huracán Alma y ambos continúan con su propio giro ciclónico bien definido. Y se encuentran separados 110 Km. entre si. También se puede apreciar en esta imagen, el giro de ambos sistemas alrededor del centroide. A las 12:15 Z se aprecia que el SCM comienza a disminuir de intensidad y más bien parece una banda nubosa del huracán pero una mayor convección al Nor-este del huracán Alma. A las 18:15 el vórtice correspondiente al huracán Alma se ve bien definido en el Océano Pacífico y el SCM se observa desorganizado en tierra.

La interacción binaria terminó debido a que el SCM se pierde al entrar a tierra, sin embargo el Huracán Alma continuó con una trayectoria hacia el oeste-nor-oeste.

En la figura 1a, se muestran las posiciones de los dos sistemas que se calcularon a partir de las imágenes de satélite, se pueden apreciar las posiciones sucesivas y la atracción que se ejercen entre si al disminuir la distancia que los separa, En la figura 1b se graficaron las posiciones anteriores, pero desde el centro común a ellos, y es en este diagrama en el que se puede observar el giro que experimentaron los dos vórtices.

#### RESULTADOS Y CONCLUSIONES.

El modelo baroclínico de dos parámetros se aplicó en tiempo real, reproduciendo con buena aproximación la interacción binaria. Las isohipsas de 700 hPa. calculadas por el modelo se muestran en la figura 2\* donde se graficaron los pronósticos cada 3 horas para poder seguir la trayectoria de ambos vórtices, el último mapa de esta figura corresponde a un pronóstico de 69

hrs., mientras que el primer mapa representa la situación inicial, es decir los contornos del día 21 de junio de 1996 a las 12:00Z.

Como puede apreciarse en el primer mapa de 700 hPa aparecen tres núcleos internos, de los cuales se asocian al huracán y al SCM los más separados, ya que así lo sugieren las imágenes de satélite, a 9 horas de pronóstico puede notarse que, que el sistema binario, formado por los dos vórtices, ha experimentado un giro y se encuentran a la misma latitud, en seguida se pierde un elemento del sistema binario, pero es evidente que se ha producido un giro y la orientación del sistema binario ha cambiado de NW-SE a NE-SW.. A 48 horas de pronóstico, la orientación del sistema binario es N-S, confirmándose de esta manera el giro ciclónico de este sistema binario, detectado por el modelo baroclínico de dos parámetros.

La figura 3 muestra las posiciones del sistema binario vistas desde el centroide, las posiciones son cada 3 horas a partir del día 21 de junio de 1996, aquí se muestra con mayor detalle la fase de atracción mutua, el giro y el escape de los dos vórtices. Puede apreciarse un meandro en la trayectoria del huracán Alma, que no se explica, ya que este puede ser resultado de la interacción con otros sistemas convectivos que se pueden ver en las imágenes satelitarias, que convierten a esta en una interacción compleja, y que es motivo de investigación intensa Holland (1995).

A pesar de la simplicidad del modelo baroclínico, y de que fue diseñado para utilizarse en latitudes medias, es capaz de detectar estos sistemas tropicales, por lo que es posible continuar aplicándolo en los trópicos.

\* La figura 2 no aparece por presentar deficiencias en el proceso de recepción. Comité Editorial.

\*\* La referencia bibliográfica no fue recibida

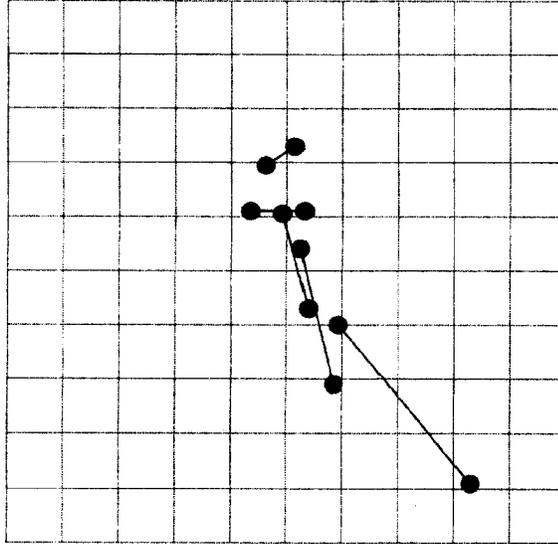


Fig. 1a. Posiciones del Huracán "Alma" y del SCM calculadas de las imágenes satelitarias.

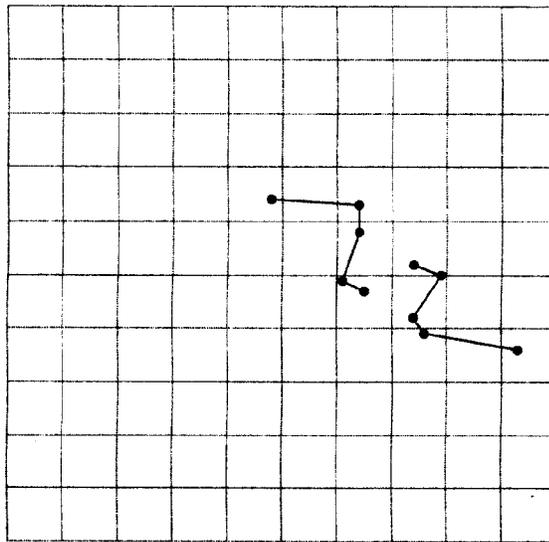


Fig. 1b. Posiciones desde el centro común.



## **Análisis del Huracán "Lili" a su paso por el Archipiélago Sabana -Camagüey (A.S.C.)**

*Ricardo Gutiérrez Guerra\*, Luis M. Batista Tamayo\*, Orlando Mayola Espinosa\*\*, Vladimir Morales Guevara\*, Oscar Benedico Rodríguez\*\*, Luis Castellanos Suárez\*, Lidice Vázquez Carvajal\*.*

*\* Centro de Investigaciones de Ecosistemas Costeros (CIEC), Cayo Coco.*

*\*\* Centro Provincial de Meteorología de Ciego de Ávila.*

**RESUMEN:** En el trabajo se muestra una relación cronológica de los principales huracanes que han afectado de alguna forma la provincia de Ciego de Ávila en los últimos 78 años, así como los principales meses de afectación. Se presenta el caso estudio de la Tormenta Tropical "Lili" por el A.S.C. y en especial por las proximidades de la estación meteorológica # 339 Cayo Coco. Se analizan la sección temporal y registros del campo de viento y presión.

**ABSTRACT:** Words show a chronological relation of the principals hurricanes which affectation to Ciego de Ávila province during latter 78 years, as soon as the principals month of affectation. Show study case of the Tropical storm "Lili" for A.S.C. and special in the proximity of the meteorological station # 339 Cayo Coco. The time section and graphical of field wind and pressure analysis.

## **INTRODUCCIÓN**

A diferencia de otros fenómenos naturales capaces de provocar grandes desastres, como es el caso de los tornados y los terremotos, los ciclones tropicales pueden ser observados y seguidos con antelación. Es de destacar que los ciclones tropicales son los sistemas meteorológicos más destructivos que existen, si se toma en consideración su tamaño o área de afectación, la violencia de sus vientos, intensas lluvias y grandes marejadas que lo acompañan.

En nuestra área de observación, conocida como región IV, existe un período que oficialmente se extiende desde el 1<sup>o</sup> de Junio hasta el 30 de Noviembre y se conoce en Cuba como temporada ciclónica. Durante ese tiempo ocurre el mayor número de organismos ciclónicos tropicales, pero esto no quiere decir que no puedan presentarse en cualquier otro mes del año, a los cuales se les denominan "extemporáneos".

La necesidad de la vigilancia meteorológica en esta región de alta sensibilidad ecológica, sometida a un fuerte desarrollo del turismo demanda la necesidad de obtener información meteorológica confiable para la realización de los pronósticos del tiempo y compatibilizar las actividades turísticas con las características climáticas del territorio a fin de lograr el éxito deseado en esta empresa.

Este trabajo tiene como objetivo mostrar las características principales que se presentaron al paso del huracán "Lili" por nuestra área, analizando el comportamiento de las diferentes variables a su paso, así como mostrar la trayectoria seguida por el mismo al cruzar el Archipiélago Sabana - Camagüey.

## **MATERIALES UTILIZADOS.**

Para la confección de este trabajo se utilizaron los datos de la estación meteorológica # 339, que se ubica en los 22° 32' N y los 78° 22' W, perteneciente al Instituto de Meteorología, situada en el Centro de Investigaciones de Ecosistemas Costeros de Cayo Coco.

Además se utilizaron las observaciones trihorarias del día 18 de Octubre de 1996 de las estaciones : Sagua la Grande # 338 y Caibarién # 348 de la provincia de Villa Clara, Camilo Cienfuegos ( Falla ) # 347 de la provincia de Ciego de Ávila, Esmeralda # 352 y Nuevitas # 353 de la provincia de Camagüey.

Las variables a analizar son : Presión Atmosférica, Viento, Precipitación y Nubosidad.

La toma de los datos se realizó con el instrumental recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (O.M.M), que cumple con las normas técnicas estipuladas, así como el procesamiento de los mismos cumple con la metodología aprobada por el Instituto de Meteorología para la red de estaciones meteorológicas en Cuba.(Nota Técnica # 182, O.M.M.).

Se emplearon además los mapas sinópticos de superficie y de trayectoria del huracán "Lili", así como las fotos satélites de los días de su afectación.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

### **Afectación de Ciclones tropicales a Ciego de Ávila.**

Según los datos de archivo y bibliográficos consultados desde 1919 hasta la fecha entre los organismos tropicales que han afectado directamente o aproximado al territorio donde se encuentra ubicada nuestra estación meteorológica y a la provincia de Ciego de Avila podemos nombrar los siguientes : Perturbación ciclónica el 20 de Octubre de 1923 : atravesó de S - N; Perturbación ciclónica el 1 de Noviembre de 1927 : próximo al W; Perturbación ciclónica el 7 de Agosto de 1928 : cruzó al W de Ciego de Avila; Perturbación ciclónica el 20 de Octubre 1931 : próximo al E; Huracán el 9 de Noviembre 1932 : próximo al E; Huracán el 31 de Agosto 1933 : próximo al E; Perturbación ciclónica el 10 de Agosto 1938 : atravesó de E - W; Perturbación ciclónica el 6 de Noviembre 1942 : atravesó de NE - SW; Perturbación ciclónica el 21 de Agosto 1945 : próximo al N; Huracán el 15 de Septiembre 1945 : próximo al N; Huracán el 12 de Octubre 1945 : próximo al W, todas ellas en la primera mitad del siglo.

En la segunda mitad del siglo los principales organismos que nos afectaron fueron: Huracán el 17 de Octubre 1950 : próximo al W; Huracán el 9 de Septiembre 1960 : próximo al NW; Perturbación ciclónica el 18 de Octubre 1961 : atravesó de S - NE; Huracán el 28 de Agosto 1964 : próximo al W; Huracán el 23 de Septiembre 1966 : cruzó al W de Ciego de Avila; Perturbación ciclónica el 15 de Octubre 1973 : atravesó de S - N; Huracán el 15 de Septiembre 1975 : cruzó al S; Huracán el 31 de Agosto 1979 : atravesó de E - W; Huracán el 9 de Agosto 1981 : cruzó al W; Tormenta tropical el 4 de Noviembre 1981 : atravesó de S - NE; Huracán el 29 de Agosto 1985 : próximo al N; Huracán el 19 de Noviembre 1985 : cruzó de NE - W; Tormenta tropical el 14 de Noviembre 1994 : próximo al N; Huracán el 18 de Octubre 1996 : próximo al N.

Comparando el porcentaje de afectación nacional de organismos tropicales por meses a Ciego de Avila los de mayor peligro son: Octubre con 14 %, Septiembre con 10 %, Agosto con 8 %

y Noviembre con 5 %. En Junio - Julio la afectación es baja, incluso nula para este último en los 78 años antecedentes.

En el período analizado Octubre con 7, Noviembre con 6, Septiembre con 5 y Agosto con 4 representan los meses de mayor incidencia de ciclones tropicales a Ciego de Avila. De esta cantidad la afectación directa a nuestra provincia por organismos tropicales es la siguiente : Octubre (4), Noviembre (3) y Agosto (2).

Comparada con los que han afectado a Cuba de forma directa e indirecta por meses en porciento es como sigue : Septiembre con 53 %, Agosto con 50 %, Noviembre con 40 %, Octubre con 38 % y Junio con 17 %.

Debido al lugar donde surgen y a la trayectoria que siguen posteriormente estos organismos, el orden de afectación por meses es el siguiente : Octubre, Septiembre, Agosto y Noviembre. Las regiones donde se forman los organismos tropicales y que posteriormente han afectado a Ciego de Avila fundamentalmente son : Atlántico Norte (entre las islas de Cabo Verde y el arco de las Antillas menores) en los meses de Junio, Agosto, Septiembre y en menor grado Noviembre. Mar Caribe occidental (en especial la zona de los golfos de Darién y de los Mosquitos) principalmente en el mes de Octubre.

La temporada ciclónica de 1996 fue activa en nuestra área geográfica ya que se formaron 13 tormentas tropicales, alcanzando la categoría de huracán 9. De estos afectaron directamente o indirectamente a Cuba 7, 5 provenientes del mar Caribe y 2 del Océano Atlántico.

#### Afectación del Huracán " Lili ".

El organismo tropical de mayor incidencia sobre nuestro territorio nacional en la temporada ciclónica 1996 fue el huracán Lili, catalogado en la Escala Saffir - Simpson como de categoría 2, el día 15 de Octubre se formó como depresión tropical, el día 16 se convirtió en tormenta tropical y el día 17 ya transformada en huracán comenzó a afectar la Isla de la Juventud en horas de la noche, en la madrugada del 18 penetra en territorio nacional por el S de Matanzas recorriendo además Cienfuegos y Villa Clara saliendo al mar en horas de la tarde por un punto próximo a Caibarién moviéndose al NE pasando cerca de nuestra estación meteorológica 339 de Cayo Coco. Los efectos de sus vientos y lluvias asociadas se hicieron sentir además en las provincias de Ciudad Habana, Pinar del Río, Sancti Spiritus, Ciego de Ávila y Camagüey.

#### Afectación directa a Cayo Coco del Huracán " Lili " ( 16 al 19 de octubre de 1996)

Es el principal fenómeno natural que ha afectado al cayo en la última década por la intensidad reportada. Los primeros vestigios de la afectación de "Lili" se aprecian a partir del día 17 a las 22 hrs cuando el viento comienza a tomar rumbo ESE y su velocidad media comienza a tener un sostenido aumento.

Ya en horas de la mañana del 18 el viento toma rumbo SE y la velocidad media aumenta hasta 20 km/h con rachas de 48 km/h, de allí en lo adelante se aprecia un considerable aumento en su velocidad media de la siguiente forma : Desde las 15 hrs aumenta a 40 km/h con rachas de 82 km/h de región S, a partir de las 16:15 hasta las 21:45 hrs aumenta con valores superiores a 50 km/h.

Particularmente en este último período se encuentra la mayor afectación del sistema en el campo de los vientos sobre Cayo Coco, debido a que en este ocurrieron los vientos sostenidos de mayor valor, al igual que las rachas máximas.

A partir de las 18 hrs el viento comienza a tomar componente SSW y es de allí donde afectan los vientos con más violencia. Desde las 17:20 y hasta las 17:50 hrs la velocidad media toma valores de 60 km/h, con sostenidos de 100 km/h y rachas de 124 km/h de dirección S. De las 17:50 hasta las 20 hrs se obtienen vientos medios de 70 km/h y sostenidos de 106 km/h durante 10 minutos y sostenidos de 104 km/h durante 8 minutos de las 18:52 hasta las 19:02 hrs, además aquí ocurren en 5 ocasiones rachas superiores a 136 km/h con una racha máxima de 139 km/h de los 220° (SW).

A partir de las 20:30 hrs el viento comienza a tomar componente WNW, ya aquí y hasta las 21 hrs la velocidad media ha comenzado a descender hasta un valor de 60 km/h con una racha de 134 km/h. De las 21 hrs el viento comienza un gradual descenso en su velocidad de la siguiente forma : Entre 21 y 23:30 hrs, velocidad media de 50 km/h con una racha de 100 km/h de componente NW, desde las 23:30 y las 10 hrs del día 19 velocidad media de 30 km/h con una racha de 69 km/h, pasando ya a componente Norte.

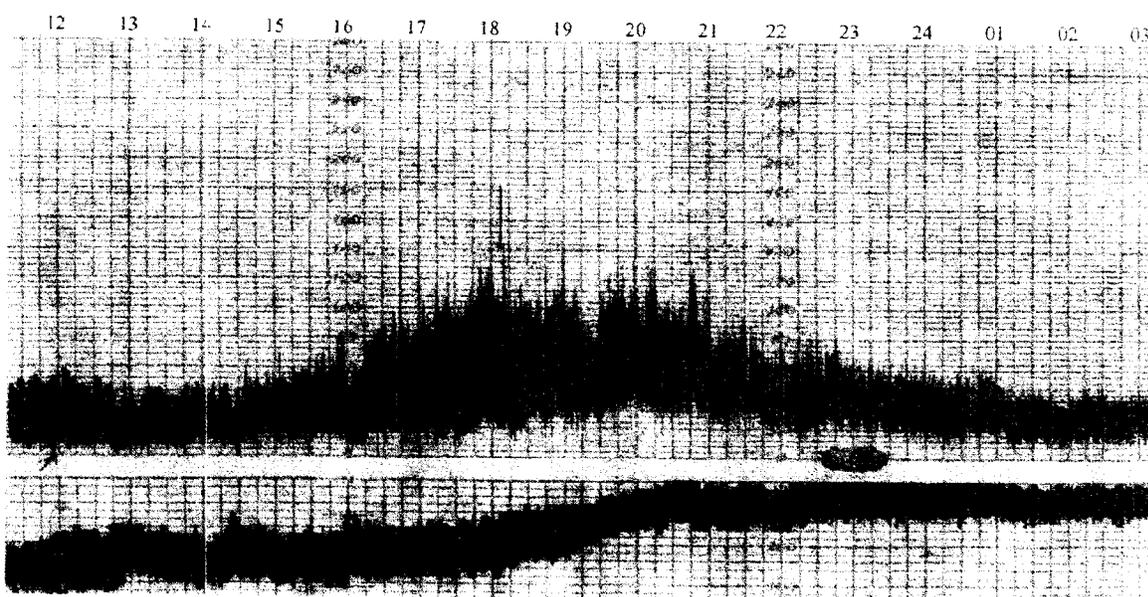


Figura # 1 : Campo de vientos asociados al paso del Organismo por Cayo Coco.

En cuanto a la nubosidad la afectación se aprecia desde el día 13 a las 10 hrs cuando se empiezan a reportar 7/8 de cielo cubierto, debido a la amplia zona de nublados que acompañó a "Lili" aún antes de convertirse en D.T. Desde el día 16 a las 19 hrs y hasta el 19 a las 01 hrs se reportaron cielos cubiertos totalmente ( 8/8 ).

Resulta significativo señalar que nunca se reportaron más de 5/8 de cielos cubiertos por nubes bajas, todos los cubiertos que se señalan (8/8) fueron por la presencia de nubes medias (As Opacus), solamente el día 18 a las 00 y 03 z y el 19 a las 06 z se reportó la presencia de Ns, algo que corrobora el paso rápido del sistemas sobre nosotros es que ya el día 19 a las 09 z se reportaba 3/8 de cielos cubiertos sin la presencia de nubes medias en el cielo.

En el campo de las precipitaciones su afectación principal fue el día 18 con un máximo considerable de 127.9 mm en 24 hrs, 80.0 mm en 6 hrs y 58.0 mm en 3 hrs, en los demás días

no se obtuvieron precipitaciones de carácter significativo, solo acumulados moderados el día 15 con 31.4 mm en 24 hrs y en los demás días acumulados bajos, 15.4 mm el día 16 y 12.2 mm el día 17.

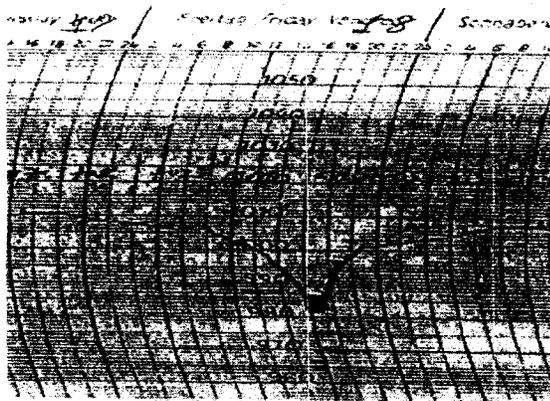
La afectación directa en cuanto a las precipitaciones comienza a ocurrir desde el día 18 a las 1 am (06 z), con ocurrencia de chubascos y lluvias de carácter moderado a fuerte acompañados de tormentas eléctricas de carácter ligero.

Solamente se precia la ocurrencia de una lluvia fuerte continua el día 18 entre las 17:50 y las 18:53 hrs con un acumulado de 58 mm (la intensidad de la precipitación fue de 0.92 mm/min.), las demás reportadas fueron lluvias y chubascos de carácter ligero, aunque algunos con rango de moderado principalmente los días 17 y 18. Es notorio señalar que el día 17 solamente ocurrieron dos chubascos de carácter moderado con un acumulado de 12.2 mm en 24 hrs.

En el campo de la presión la influencia del sistema se aprecia a partir del día 18 cuando comienza a descender la misma con valores de 1007.9 hPa a las 04 hrs y se mantiene por debajo de 1010 hPa hasta el día 19 a las 19 hrs con valores de 1009.1 hPa.

El mayor descenso de la presión en la estación se produce a las 19 hrs del día 18 con un valor mínimo de 982.8 hPa. Se obtuvieron valores inferiores a 1000 hPa desde las 15 y hasta las 22 hrs, el análisis del gráfico reporta un rápido descenso y ascenso de la presión mínima, lo que muestra el rápido desplazamiento del sistema por nuestras cercanías.

Hora	Presión (hPa)
15	997.3
16	994.2
17	990.1
18*	984.8
19	982.8
20	989.2
21	994.7
22	997.8



El análisis de la curva de la presión nos muestra un descenso continuado desde las 10 am (15 z) hasta las 19:10 y luego comienza a ascender rápidamente, lo que muestra que a esta hora es donde el sistema estuvo más cerca de nosotros.

Figura # 2 Campo barométrico asociado al paso del Organismo por Cayo Coco.

**Análisis de su trayectoria.**

Del análisis de la Sección Temporal (figura # 3), se aprecia que el Organismo Tropical "Lili", cruzó próximo a Sagua la Grande por su sector Este entre la 1 PM (18 z ) y las 4 PM (21 z). Según una información resumen obtenida posteriormente a través de INTERNET, "Lili" tenía una presión central mínima de 975 hPa y vientos máximos de 145 km/h.

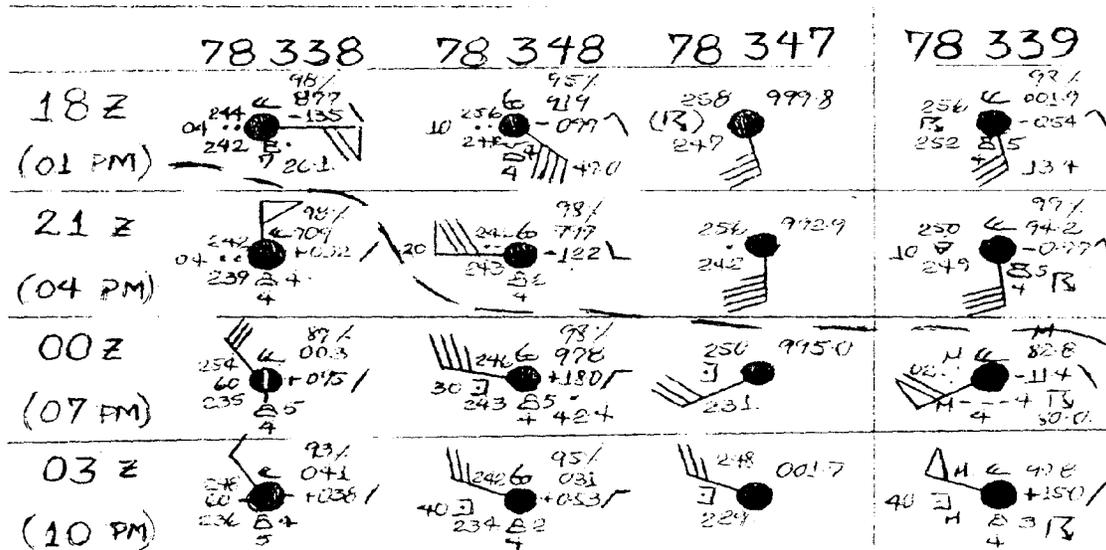


Figura # 3 : Sección Temporal del Tiempo para el día 18 de Octubre de 1996 de las Estaciones meteorológicas con influencia en el Archipiélago Sabana - Camagüey (A.S.C).

A las 18 z Sagua la Grande reportaba vientos del Este y una presión de 987.7 hPa y a las 21 z, vientos del Norte más débiles que en la observación anterior y una presión de 990.9 hPa, lo que indica que cruzó por Sagua más próximo a las 18 z.

Con estas características penetró en el Archipiélago Sabana - Camagüey cruzando su centro justamente por encima de Cayo Frágoso aproximadamente a las 6 PM (23 z), luego continuó por el Norte muy cerca de los Cayos Francés y Santa María.

El momento de mayor proximidad del Organismo Tropical a Cayo Coco fue alrededor de las 00 z donde según la citada fuente a esta hora se localizaba en los 22.7 °N y los 78.5 °W a una distancia entre 20 a 40 km casi al Norte de Cayo Coco. Se reportaban en esta estación vientos muy fuertes del SW como se puede apreciar en la Sección Temporal a las 00 z. En el barómetro de la estación se midió a esta hora una presión de 982,8 hPa.

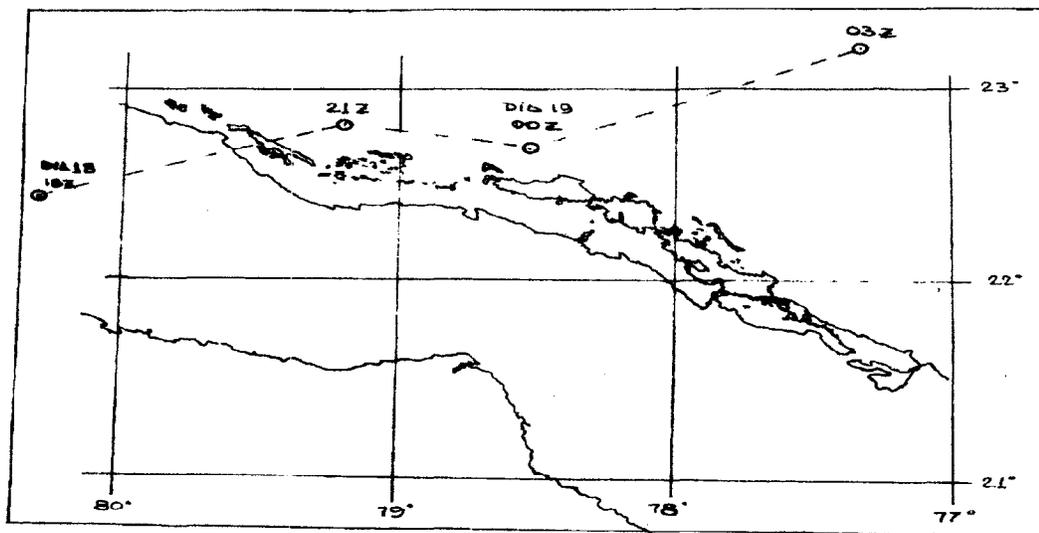


Figura # 3 : Trayectoria seguida por el Huracán "Lili" a su paso por el A.S.C.

### CONCLUSIONES

- La Tormenta Tropical "Lili" penetró en el A.S.C. aproximadamente a las 15 hrs en un rumbo próximo al ENE pasando por encima de Cayo Frágoso.
- El momento de mayor proximidad a Cayo Coco fue a las 19 hrs y su centro se estimó a una distancia entre 20 y 30 km al Norte de Cayo Coco.
- Por la trayectoria descrita y a la alta velocidad de traslación que adquirió al salir al mar ( $\approx 30$  km/h) las alteraciones en los ecosistemas más notables se produjeron en la parte boscosa siempreverde micrófila, en la especie conocida como Almácigo que por ser de textura leñosa y frágil sintió más los embates del viento.
- Según valoraciones inmediatas realizadas en la parte sur de Cayo Coco se estimó una merma de unos 2000 ejemplares de Flamencos (*Phoenicopterus Rubes Rubes*) que anidan en esta región, siendo esta la parte de la avifauna más afectada.

- Los efectos de la marea de tormenta o de surgencia fueron insignificantes precisamente por la trayectoria descrita por el organismo.
- Por ser el E.S.C. una región natural de alta sensibilidad ecológica, donde existen valores naturales de alto valor científico, la vigilancia meteorológica ante los posibles efectos de fenómenos peligrosos debe ser tomada en consideración.

#### **BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA.**

1. Ballester M., García O. y Rubiera J. (1997): Temporada ciclónica de 1996 en el Atlántico Norte.
2. CIEC. CITMA. (1997). Información de Archivo.
3. GEF/PNUD. (1997). Monitoreo de las variables meteorológicas que intervienen en el estado del tiempo y el régimen hidroclimático como parte del S.G.V.A. Informe parcial Oct. 1996 - Sept. 1997.
4. Saucier W. (1969). Principles of Meteorological Analysis.

## HURACANES EN CIENFUEGOS Y EL CAMBIO SINOPTICO DE LA PRESION ATMOSFERICA

*FERNANDEZ GARCIA Antonio de J., LECHA ESTELA Luis B., SANTANA NUÑEZ Obdulio, CUBAS LOFORTE Darvel, RUIZ ARIAS Alfredo, LEON GONZALEZ Omar y NAVARRETE ROQUE Orestes.*

**RESUMEN.** En el trabajo se presentan las características de los tres huracanes que han azotado la provincia de Cienfuegos (CUBA) en el presente siglo: El del 28 de Septiembre de 1935, El "Fox" del 24 de Octubre de 1952 y más recientemente el "Lili" que afectó la provincia el 18 de Octubre de 1996. Se establecen comparaciones entre distintos parámetros de estos sistemas: viento máximo medido o estimado, lluvias asociadas, velocidad de traslación y tiempo de afectación de los vientos huracanados. Los resultados del trabajo demuestran que a pesar de que el Huracán "Lili" fue el que presentó los vientos menos fuertes en comparación con el "Fox" y el de 1935, el impacto y los daños causados por el meteoro fueron mayores debido al prolongado período de exposición en presencia de los vientos huracanados. También se realiza un estudio relacionado con el cambio de la presión atmosférica producido por un grupo de tormentas tropicales y huracanes que han cruzado sobre o cerca de la isla. Finalmente, se obtienen resultados que demuestran la estrecha relación existente entre los núcleos catalobáricos para diferentes períodos de tiempo y el desplazamiento a muy corto plazo de estos organismos. Se adjuntan tablas, gráficos que ilustran el contenido del trabajo.

**ABSTRACT.** The characteristics of three hurricanes of the present century, that have crossed over the province of Cienfuegos (CUBA) are studied in this paper: The Hurricane of September 28 of 1935, Hurricane "Fox", October 24 of 1952 and Hurricane "Lili", October 18 of 1996. Different parameters are compared among these systems: measured or estimated maximum winds, associated rainfalls, velocity movements and hurricanes winds periods. Results have shown that the damages and impacts caused by "Lili" were bigger due to the presence of long period of time hurricanes winds over the places, in spite that the forces of Lili's winds were less intense. An study about the change in atmospheric pressure due to tropical storms and hurricanes that have crossed over Cuba and its surrounding is performed. Finally the results obtained show that there is a close relationship between catalobaric cores for different periods of time and displacement of this system.

### INTRODUCCION

La provincia de Cienfuegos se encuentra ubicada en la parte central de Cuba. Esta región del país es afectada por organismos tropicales, aunque con menos frecuencia e intensidad que en la parte Occidental de Cuba, Rodríguez y Ballester (en prensa). En el siglo XX la provincia ha sido azotada por tres ciclones tropicales : El Huracán del 28 de Septiembre de 1935, El Huracán "Fox" del 24 de Octubre de 1952 y más recientemente el Huracán "Lili" que azotó a Cienfuegos el 18 de Octubre de 1996.

En el presente trabajo se realiza una comparación entre estos huracanes. Se evalúan diferentes aspectos relacionados con las características de estos organismos ciclónicos, y se hace hincapié en el impacto que estos sistemas produjeron a su paso por la provincia. También se establecen diferencias entre la máxima intensidad alcanzada y el efecto combinado por la duración de los vientos huracanados y las lluvias intensas causadas por estos meteoros.

El desplazamiento de las tormentas tropicales y los huracanes es un aspecto de vital interés cuando estos organismos se encuentran próximos a las costas cubanas. El análisis del cambio de la presión atmosférica y el campo isalobárico para diferentes períodos de tiempo, ha sido una herramienta utilizada tradicionalmente por los sinópticos en el pronóstico de los ciclones tropicales, Ortiz (1972). La eliminación del efecto producido por la marea barométrica en la presión atmosférica posibilita estudiar el cambio de la presión para diferentes períodos de tiempo y establecer relaciones entre los campos isalobáricos y el movimiento de las tormentas a muy corto plazo .

## MATERIALES CONSULTADOS Y METODOLOGIA EMPLEADA.

Para llevar a cabo este trabajo fueron consultados diversos datos, que fueron recopilados al paso de los tres huracanes que han afectado directamente la provincia de Cienfuegos en el transcurso del presente siglo. También fue utilizada una muestra de 15 años en el periodo comprendido entre 1982 y 1996 (5400 casos), para la cual se evaluó el cambio trihorario de la presión atmosférica en los periodos de: 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, y 21 UTC.

Estas muestras fueron subdivididas por horarios y por meses, y a partir de ellas fueron calculados diversos parámetros estadísticos. De esta manera el Cambio Trihorario de la Presión Atmosférica se definió como:

$$\text{Tend}_3 \text{ PPP} = \text{Tend}_3 \text{ SINOP PPP} + \text{Tend}_3 \text{ MAREA BAROMET.} \quad (1)$$

De aquí se infiere que el Cambio Trihorario de la Presión Atmosférica que se mide en una estación meteorológica tiene 2 componentes básicas: La inducida por el proceso sinóptico dominante y la aportada por el efecto de la marea barométrica. El efecto de la marea barométrica es "positivo" en el horario de las 00, 03, 12, y 15 UTC y "negativo" en los horarios de las 06, 09, 18 y 21 UTC. De la expresión (1) se tiene que la tendencia trihoraria inducida por el proceso sinóptico, viene dada por:

$$\text{Tend}_3 \text{ SINOP PPP} = \text{Tend}_3 \text{ PPP} - \text{Tend}_3 \text{ MAREA BAROMET.} \quad (2)$$

Se utilizó éste parámetro estadístico para realizar un estudio preliminar sobre el comportamiento de la trayectoria de las tormentas y huracanes próximos al país, en estrecha relación con los núcleos catalobáricos de la  $\text{Tend}_3 \text{ SINOP PPP}$ . Para este estudio fue tomada una muestra formada por 14 organismos tropicales (entre Tormentas y Huracanes) que cruzaron sobre o cerca del territorio nacional. Los organismos fueron: David (Ago.79), Frederic, (Sep.79), Denis, (Ago. 81), Katrina, (Nov.81), Kate (Nov.85), Floyd (Oct. 87), Gilbert (Sep. 88), Karen (Nov. 89), Marcos (Oct. 90), Fabian (Oct. 91), Andrew (Ago. 92), Gordon (Nov. 94), Roxana (Oct. 95) y Lili (Oct.96).

La expresión (2) posibilita la comparación entre los datos trihorarios del cambio de presión por el efecto sinóptico. De esta manera queda eliminado el efecto de la marea barométrica y las variaciones de la presión atmosférica son consecuencia directa de la evolución del proceso sinóptico en el entorno de la localidad de que se trate. La información brindada por este parámetro para diferentes periodos de tiempo fue analizada para calcular la ubicación y magnitud de los posibles centros catalobáricos asociados al desplazamiento a muy corto plazo de las tormentas y huracanes estudiados. Se aplicó la técnica estadística de Análisis de Varianza para demostrar la existencia de diferencias significativas entre las muestras analizadas.

## HURACANES QUE HAN AZOTADO CIENFUEGOS EL PRESENTE SIGLO.

En la Tabla 1 se muestra un resumen de las principales características de los 3 huracanes que han impactado sobre la provincia de Cienfuegos en el presente Siglo XX. Según Fernández (1977), el viento máximo estimado al paso del huracán de Septiembre de 1935 en la ciudad de Cienfuegos fue de 202 km/h. Rodríguez y Ballester (en prensa) plantean que este organismo estuvo en el límite entre un huracán de moderada y de gran intensidad a su paso por la región central de Cuba.

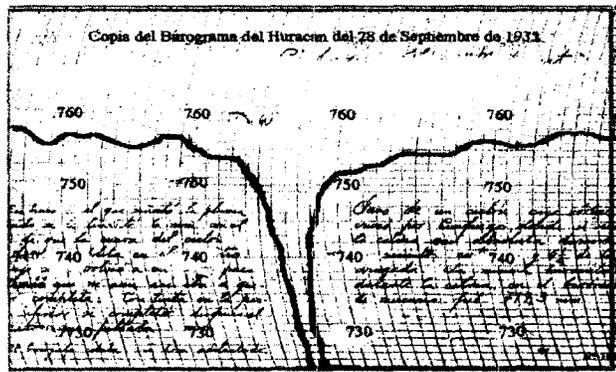
**Tabla 1 . Indicadores de los Huracanes que han azotado a Cienfuegos en el siglo XX.**

ORGAN.	P. ATMOSF.MIN	VTO.MAX.MED.	VTO.MAX.ES.	LLUVIAS	TIEM.VTO.HUR.
28-9-1935	717,3 mm	-	202 km/h	80-130 mm	1 h y 30 min
24-10-1952	730,0 mm	160 km/h	170-190 km/h	250-350 mm	2 h y 30 min
18-10-1996	733,2 mm	167 km/h	170-190 km/h	300-500 mm	3 h y 10 min

Nota: La medición de la presión atmosf. en el Huracán de 1952 se realizó en el poblado de Abreus, según Lecha et al (1994).

El Huracán de Septiembre de 1935 produjo los vientos más intensos y la presión mínima más notable que se ha registrado en la ciudad de Cienfuegos, en el presente siglo, (Fig. 1). El desplazamiento relativamente rápido del huracán y las escasas lluvias asociadas. hizo que los daños fueran comparablemente menor a los causados por el "Lili". Este último, tuvo un lento desplazamiento y los vientos huracanados por espacio de tres horas afectaron la capital de la provincia.

En el caso del "Fox" (Octubre de 1952) fue catalogado como Huracán de Gran Intensidad al SUR de la región central y los vientos más intensos se registraron en el municipio Aguada de Pasajeros. El antiguo Central Covadonga (actual CAI "Antonio Sánchez" ) fue arrasado al paso del meteoro. En la ciudad de Cienfuegos sólo se reportaron rachas huracanadas a intervalos por un espacio de tiempo de 1 hora.



**Fig. 1 Barograma del Huracán de Sept. del 35.**

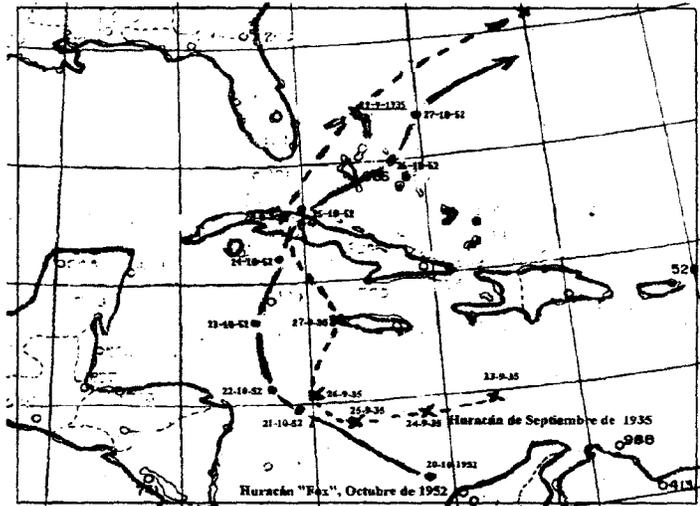
El diámetro pequeño de los vientos huracanados intensos del "Fox", (no superior a 30 km) fue un factor determinante para que los daños causados por la tormenta no fueran comparables con lo ocurrido en el caso del Huracán "Lili".

La Fig.2 muestra las trayectorias de los huracanes de 1935 y 1952 a su paso sobre la región central de Cuba. El huracán de Septiembre de 1935 se desplazó por los mares ubicados entre Caimán Grande, Jamaica y las provincias orientales de Cuba. En los días anteriores y en las vísperas del azote del huracán se presentaron días con buen tiempo, sin precipitaciones y con actividad abundante de nubes del tipo cirrus estratos en las capas altas de la tropósfera. Incluso en la noche del día 27 el cielo estuvo estrellado hasta más allá de las 10 de la noche y el avance del meteoro fue repentino con el aumento de los vientos y la llegada de los primeros fractus cúmulos nimbosos

Otro aspecto importante fue el hecho de que el Huracán de 1935 se desplazó a una velocidad promedio próxima a 25-27 km/h sobre la región central de Cuba. Los vientos huracanados llegaron después de las 3 a.m. en Cienfuegos y estuvieron afectando por un espacio de tiempo de hora y media a dos horas.

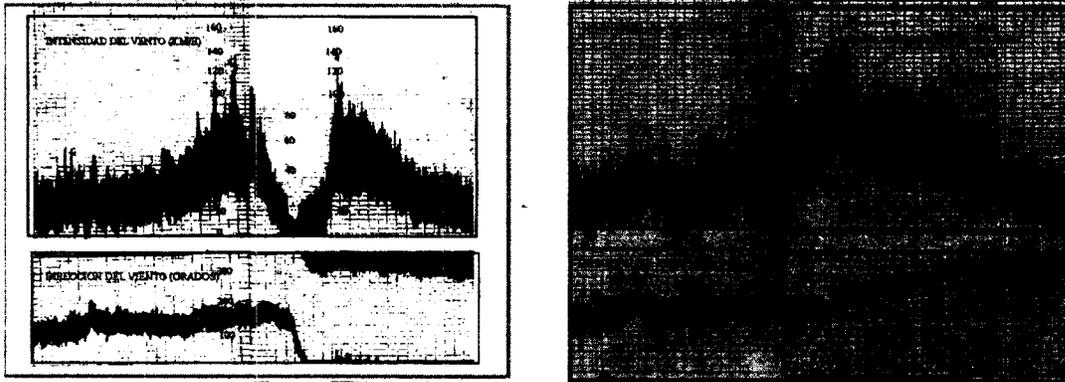
El Huracán "Fox" del 24 de Octubre de 1952, se desplazó con menor velocidad de trasla (entre 15-20 km/h), pero se caracterizó por tener un diámetro muy reducido de vientos huracandos intensos (que no sobrepasaron los 30-35 km).

Al paso por las proximidades de Cayo Guano del Este, se registró una presión mínima central de 705 mm, Lecha et al (1994). Un avión caza huracanes de reconocimiento perdió la pintura



### PARTICULARIDADES DEL HURACAN "LILI" A SU PASO POR CIENFUEGOS.

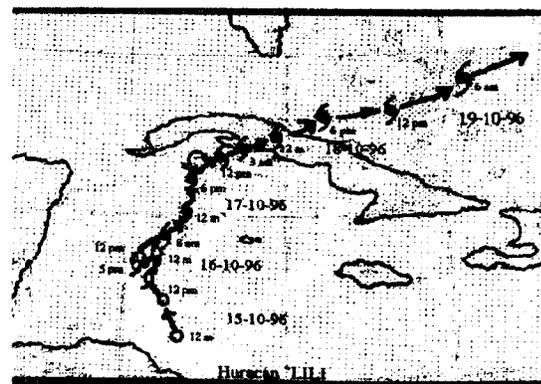
La Fig. 3 se muestra los anemorumbogramas de las estaciones meteorológicas de Cienfuegos y Aguada de Pasajeros. Una cuerda del sector noroeste del vórtice del "Lili" cruzó por la localidad de Aguada de Pasajeros, imperando un período prolongado de relativa calma durante más de 1 hora. La ciudad de Cienfuegos no estuvo expuesta al vórtice de la tormenta,



**Fig. 3 Anemorumbogramas de las estaciones meteorológicas de Aguada de Pasajeros y Cienfuegos al paso del "Lili" el 18 de Octubre de 1996.**

(de más de 30 km de radio), pero sin embargo fue afectada por los vientos más intensos del sector derecho de la trayectoria. En la estación meteorológica de Cienfuegos se reportó una racha de 167 km/h. Evaluaciones realizadas a partir de los daños producidos por el meteoro, hacen suponer que en otras partes de la ciudad y en la vertiente sur de la zona montañosa de Cumanayagua ocurrieron vientos en rachas superiores a los 180 km/h. En la parte montañosa citada ocurrió un desastre ecológico sin precedentes. La trayectoria de la tormenta se observa en la Fig. 4.

Lili presentó una trayectoria poco común para el mes de Octubre por su marcada inflexión al NORDESTE en los mares al SUR de la Isla de la Juventud. El desplazamiento al ESTE de una onda corta vigorosa que se encontraba extendida sobre la parte oriental del Golfo de Mexico, produjo el giro de la trayectoria de "Lili" hacia el primer cuadrante.



**Fig. 4 Trayectoria del Huracán "Lili".**

## NUCLEOS CATALOBARICOS Y TRAYECTORIAS DE ORGANISMOS TROPICALES EN LAS CERCANIAS DE CUBA.

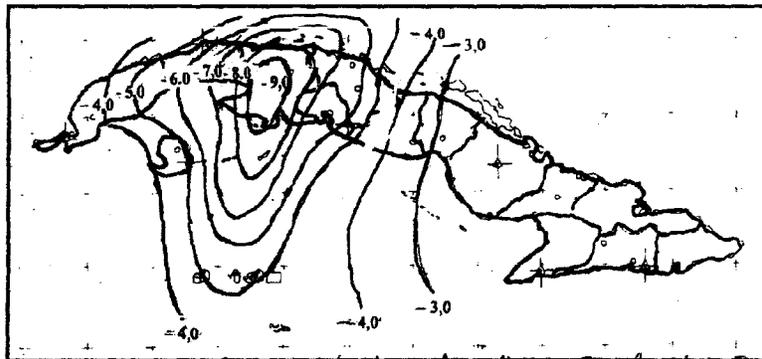
La técnica de Análisis de Varianza se aplicó a dos muestras: La primera formada por las tormentas y huracanes que en su desplazamiento cerca de Cuba afectaron el territorio nacional y el segundo formado por aquellos organismos que estando próximos no llegaron a penetrar en tierra y pasaron a más de 100 km de las costas de Cuba. La Tabla 2 muestra diferencias significativas entre los núcleos isalobáricos producidos por el efecto sinóptico para períodos de 3, 6 y 9 horas. Cuando se presentaron núcleos catalobáricos fuertes se produjo un desplazamiento general de la tormenta hacia las inmediaciones del máximo negativo en el período entre las 8 y 12 horas siguientes. Los mejores resultados se observaron con la suma de los cambios trihorarios para períodos de hasta 9 horas. Estos resultados fueron comparados con el campo isalobárico de 24 horas (que tiene eliminada la marea implícitamente), no encontrándose diferencias significativas para este último de acuerdo con los valores hallados del estadígrafo de la Prueba F.

**Tabla 2. Valores medios (hPa) de los máximos catalobáricos en organismos cercanos.**

TIPOS DE ORGANISM.	CAMBIO 3 H	CAMBIO 6 H	CAMBIO 9H
Organismos que cruzan por Cuba	-3,5	-4,9	-6,1
Organismos que no cruzan.	-1,1	-1,6	-2,1

La Fig.5 muestra el campo del cambio de la presión atmosférica (eliminado el efecto de la marea barométrica), en el período comprendido entre las 2100 UTC del día 17 de Octubre y las 0600 UTC del 18 de Octubre de 1996, cuando el Huracán "Lili" se encontraba próximo y al NORDESTE de la Isla de la Juventud. Un fuerte núcleo catalobárico de - 9 hPa se encuentra extendido sobre la provincia de Matanzas, adyacente al extremo occidental de Cienfuegos indicando la trayectoria del "Lili" en las próximas 12 horas.

Esto confirma la importancia que tiene la red de estaciones meteorológicas de superficie cuando se aproxima un huracán, independientemente de la información brindada por las imágenes de satélite, radares y modelos de pronósticos.



**Fig. 5 Campo isalobárico de las 06 UTC del 18 de Oct. del 96.**

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Los tres huracanes que han afectado la provincia de Cienfuegos en el presente siglo XX han presentado diversas características, teniendo en cuenta el tiempo el período de exposición ante la fuerza de los vientos huracanados, la influencia del sector del sector de la trayectoria de la tormenta y la intensidad de las lluvias. A pesar de que "Lili" fue el de menor intensidad de los vientos, este huracán afectó con vientos superiores a 100 km/h durante más de 3 horas y las lluvias asociadas al fenómeno alcanzaron más de 300-350 mm promedios en 48 horas.
- El Huracán del 28 de Septiembre de 1935 produjo vientos superiores en intensidad, pero durante un período de tiempo mucho menos prolongado. Este Huracán se aproximó por su sector débil a Cienfuegos, produciéndose un deterioro repentino de las condiciones meteorológicas en un período corto de tiempo. Las lluvias en la provincia fueron mucho menos intensas que en los casos de los huracanes Fox (de Oct. 1952) y Lili (de Oct. 1996).
- A pesar de que "Fox" fue catalogado como Huracán de gran intensidad en los mares al sur de la región central de Cuba, llegó a nuestras costas con vientos menos fuertes. El diámetro de los vientos huracanados era muy estrecho y a diferencia con el "Lili" y el de Septiembre de 1935 cruzó por el extremo occidental de la provincia.
- Los cambios de presión atmosférica aislados del efecto de la marea barométrica, pueden ser empleados para la evaluación de la futura trayectoria de un organismo tropical que se aproxime a nuestras costas. Se demostró que la información brindada por este indicador, supera la tendencia en 24 horas para estos fines. Se recomienda, el posible desarrollo de un método de pronóstico estadístico a muy corto plazo, que pueda emplearse cuando un organismo ciclónico se aproxime a las costas de Cuba.

## BIBLIOGRAFIA CONSULTADA.

- Fernández, A.J. (1977): El huracán de Septiembre de 1935. Información Técnica # 1, del Centro Multisectorial de Villa Clara, ACC, 20 pp
- Lecha L.B., Paz L.R. y B. Lapinel (1994): El Clima de Cuba, Editorial Academia, La Habana, 186 pp.
- Ortiz R. (1972): Los campos isalobáricos de 24 horas y el pronóstico de trayectoria de huracanes. Serie Met. No. 2, INSMET, ACC, 35 pp.
- Rodríguez M. y M. Ballester (en prensa): Informe actualizado sobre la cronología de huracanes que han afectado a Cuba en los últimos 200 años (1785-1984). En Nuevo Atlas Nac. de Cuba, Inst. de Geografía ACC, La Habana-Madrid.

## Génesis y desarrollo del huracán Allison.

*Marina Sosa Hurtado, Yunit Juantorena Alén y Pedro Beauballet Padrón  
Instituto de Meteorología, Cuba*

**RESUMEN:** El presente trabajo realiza un estudio de la evolución que se presentó en la atmósfera tropical los días previos a la formación del huracán. Se encontró que la formación temprana de una circulación ciclónica en los niveles medios, con fuerte cizalladura horizontal fueron importantes en el desarrollo e intensificación de Allison. Cuando este sistema era una onda tropical, otros factores tales como una fuerte convergencia/divergencia y los movimientos verticales que tienen lugar en la formación de las nubes, la débil cizalladura vertical del viento zonal y el desplazamiento del sistema sobre una zona de alta temperatura superficial del mar jugaron un papel importante también. La influencia sobre Cuba, el mar Caribe y el golfo de México permitió realizar el cálculo de los elementos de ola en este organismo mediante técnicas espectrales.

**ABSTRACT:** This paper makes a study about the tropical atmosphere evolution before the hurricane formation. It was found that an early cyclonic circulation in the middle levels, with strong horizontal shear, were important for the genesis and intensification of Allison. When this system was a tropical easterly wave, other factors like strong convergence/divergence and the vertical motion which takes place in clouds formation, the weak vertical shear and the displacement over high sea surface temperature played an important role too. The influence over Cuba, the Caribbean Sea and the Gulf of Mexico allowed a spectral techniques analysis of the sea wave produced by this system.

### Introducción.

Los primeros trabajos que sugieren la formación de ciclones tropicales en el Atlántico occidental y en el mar Caribe a partir de disturbios observados en tierras africanas, se remontan a la década del 30 del presente siglo. Posteriormente, Riehl (1945) al publicar su primer trabajo sobre ondas en los Este, ya empezaba a relacionar las variaciones de la presión en la superficie y la tropósfera inferior con la formación de bajas cerradas y su posterior profundización. Desde entonces, numerosos autores han relacionado la intensificación de las ondas tropicales sobre el océano Atlántico con otros factores como pueden ser la alta temperatura del mar, el parámetro de Coriolis, el reforzamiento del anticiclón Azores-Bermudas y su desplazamiento al sur de su posición media, la existencia de una considerable cizalladura horizontal del flujo en la superficie y una débil cizalladura vertical del viento zonal, por sólo citar algunos (Sosa, 1995). En años recientes, Avila (1990) comprobó que las ondas africanas son la principal fuente de formación de ciclones para toda la cuenca Atlántica.

En el presente trabajo se ha querido estudiar el huracán Allison, primero de los ciclones tropicales formados en 1995, segunda temporada más activa del presente siglo, solamente superada por la de 1933 y donde el 67% de los ciclones que se formaron lo hicieron a partir de ondas tropicales. Este estudio consiste en analizar la evolución que sufrió la atmósfera tropical cercana a la onda para que la misma alcanzara la categoría de huracán, a la vez que se realiza el cálculo de los elementos de ola en este organismo mediante técnicas espectrales.

### Materiales y métodos

Fueron consultados los mapas isobáricos y del campo de ola de la superficie y los de topografía bórica, las imágenes de los satélites meteorológicos y otras informaciones confeccionadas por el Instituto de Meteorología desde que la onda tropical emergió de Africa,

durante el tiempo en que afectó a Cuba, en su gradual intensificación sobre el occidente del Caribe y en el transcurso de su vida como un ciclón tropical. Con los datos aerológicos y de la superficie se realizaron análisis de los campos de flujo, espesor, vorticidad, divergencia, cizalladura horizontal y vertical del viento, temperatura del aire y del mar, así como el oleaje producido por la onda a su paso por el Caribe y luego en su vida como ciclón tropical.

Se utilizó el paquete de programas **METINFO** para el cálculo de algunas de las magnitudes termodinámicas estudiadas en el trabajo. Para determinar el campo de olas y de viento de Allison se aplicó el programa **CTCOVAR** (Peñate, 1990) y para el cálculo de la propagación de la energía en 7 direcciones  $\phi = 0^\circ, \pm 15, \pm 30, \pm 45^\circ$ , donde  $\phi$  es el ángulo que se forma entre la dirección del viento en el área generadora y la dirección de propagación del oleaje, se aplicó un mecanismo sencillo de dispersión (OMM, 1988). Además, en el estudio de la propagación de la energía se analiza la interferencia que sufre la ola en presencia de un viento con una dirección determinada.

### Resultados

El huracán Allison, primero de la temporada ciclónica de 1995 en la región Atlántica, tuvo su origen en una onda africana que llegó al mar Caribe el 29 de mayo y afectó a Cuba del día 31 de mayo al 2 de junio, mostrando a su paso por el país un patrón nuboso activo y una velocidad de traslación entre 15 y 25 km/h (Sosa et al, 1996). La secuencia de esta onda y la trayectoria del ciclón se muestran en la Fig. 1.

Inicialmente, mientras esta onda avanzaba por el mar Caribe al Este de Cuba, su eje se hallaba inclinado a la derecha con la altura, mostrando su mayor actividad de tormentas a la derecha de la posición del eje en 700 hPa. El día 31, aunque la onda aparecía reflejada en la superficie dentro del flujo de los Estes, se estructura una circulación ciclónica a un kilómetro de altura sobre el Caribe occidental. La temperatura del aire en la superficie era por la tarde de 32 °C, mientras que la temperatura del mar en la zona oscilaba entre 26 y 29°C. El oleaje no sobrepasaba los 2 m de altura.

El día 1° de junio, tanto la temperatura del aire en la superficie como en las capas bajas de la atmósfera permanecía con poco cambio al igual que el oleaje. Sin embargo, durante la noche, se estructura una baja de 1008 hPa en los mares al Norte de Honduras como reflejo de la circulación en los bajos niveles y comienza a experimentarse un ascenso en las temperaturas cercano a 1°C, tanto en la superficie como en los niveles bajos de la atmósfera.

Desde que la onda comenzó a afectar a Cuba, se observó difluencia en las capas superiores de la atmósfera que facilitaba los movimientos verticales ascendentes y el desarrollo convectivo de las nubes. Sin embargo, a partir del día 1°, se presentó de forma simultánea un marcado influjo en los niveles de 850 y 700 hPa con difluencia anticiclónica en el nivel de 200 hPa. La presencia de una circulación ciclónica en las capas bajas con influjo y convergencia sobre la zona de la onda y la recién formada baja unido a esa salida superior, alertaban tempranamente la posible intensificación del disturbio. Además, esta convergencia en niveles bajos del día 1° al día 2 se fue haciendo más marcada en la zona del disturbio y provocó el transporte ascendente de la humedad así como un enfriamiento adiabático, una mayor condensación y un incremento de los nublados y las precipitaciones que ya se extendían a todo el país y el Noroeste del mar Caribe.

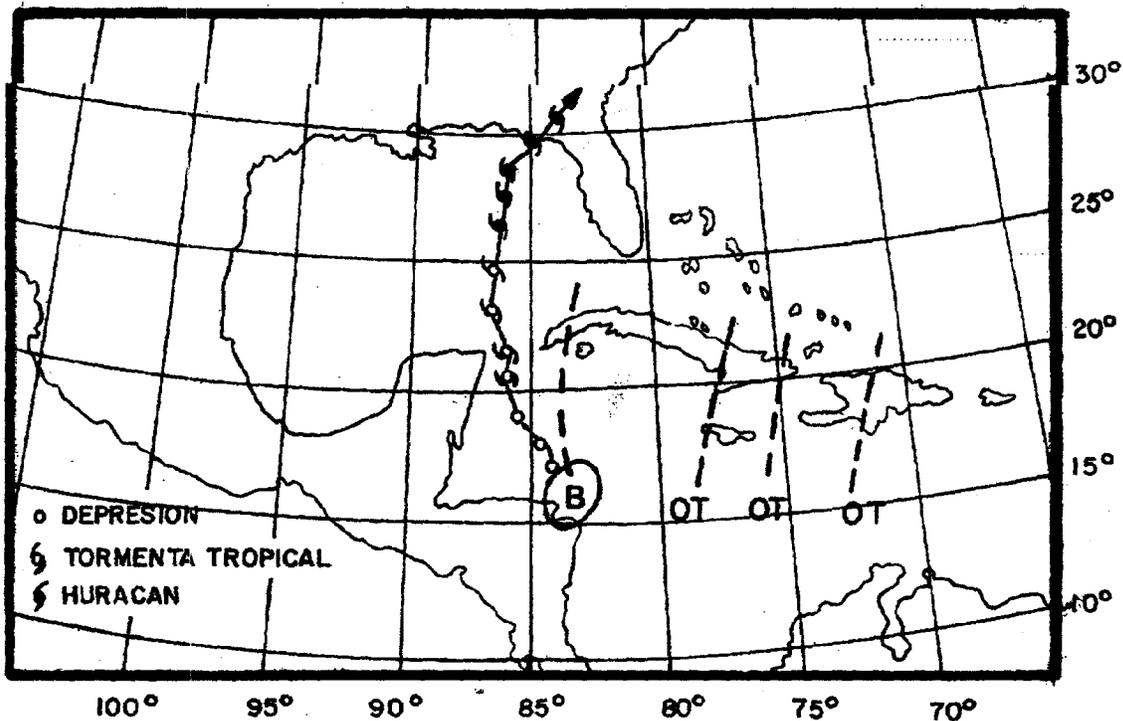


Fig. 1. Posiciones de la onda tropical sobre Cuba y trayectoria de Allison desde su estadio de depresión en el mar Caribe hasta su penetración en tierra como huracán.

El día 2, la baja en la superficie ha tenido poco movimiento, con el eje de la onda extendido sobre la provincia de Pinar del Río (donde continúan las precipitaciones); en la altura el eje se ha ido inclinando hacia el oeste apareciendo casi en fase con la posición de la superficie. Con la formación de esta baja se ha incrementado notablemente la cizalladura horizontal y la curvatura, haciendo que la circulación ciclónica se propague hasta el nivel de 700 hPa.

Desde el 31 hasta el 2 la onda, con su extensa actividad de chubascos y tormentas eléctricas, se ha ido liberando calor latente y en la capa entre 500 y 200 hPa se manifiesta un aumento de la temperatura cercano a 1°C, como el observado en el huracán Hilda en 1964 (Hankins y Rubsam, 1968). En el nivel de 700 hPa fue observada una disminución de la temperatura en la zona del disturbio antes de que el ciclón se formara, con un incremento cercano también a 1°C, en el momento de alcanzar el organismo la categoría de tormenta tropical. Esta disminución inicial de la temperatura para luego alcanzar un máximo, coincidente con el momento de la intensificación y profundización del disturbio, fue señalado por Ballester et al (1990) al estudiar varios organismos que cruzaron por el mar Caribe y el golfo de México, pero en esos casos esto ocurría en el nivel de 850 hPa. Por su parte, al desplazarse la onda tropical sobre el Noroeste del mar Caribe y el occidente de Cuba, ha encontrado aguas ligeramente más cálidas, observándose un máximo de 30°C en la zona del Golfo de Honduras.

En cuanto a la vorticidad, que en otros casos estudiados con anterioridad (Dina, 1991; Sosa et al, 1996) no se había observado claramente la presencia de valores positivos en el nivel de 850hPa en los primeros estadios del ciclón, en el caso que se estudia, los valores negativos observados el día 31 se tornaron positivos en toda el área, con valores entre 6 y 8 x 10<sup>-5</sup> seg<sup>-1</sup>

en el Noroeste del mar Caribe. El día 2, cuando aún no se ha formado la depresión tropical, esta vorticalidad positiva aparece concentrada hacia el golfo de Honduras y sobre el Sur del Caribe occidental, siendo negativa en el resto. Al parecer, en este caso, la temprana formación de una circulación ciclónica en los niveles bajos la cual se propagó hasta la superficie antes de que se formara la depresión, unida a la fuerte cizalladura horizontal, fueron determinantes en el cambio de signo de esta magnitud.

La cizalladura vertical del viento zonal, analizada en todo el tiempo previo a la formación de Allison, fue pequeña con valores entre 4 y 8 m/s. A partir del día 3, esta cizalladura se incrementó hasta valores entre 16 y 20 m/s. Estos valores pequeños en su estadio de onda fueron creando las condiciones propicias para la acumulación de la energía que necesitaba el organismo para su propia intensificación. Sin embargo, una vez desarrollado, esta magnitud pierde la importancia que tenía en sus etapas iniciales pues él mismo va creando un mecanismo de mantenimiento, que le ayuda a enfrentarse al entorno sobre el cual se mueve.

Todas estas condiciones hicieron posible la formación de la primera depresión tropical en la noche del día 2 y en la mañana del 3 la presión central descendía a 1005 hPa, mientras se observaba en las imágenes de los satélites meteorológicos una mejor organización de la convección así como en la circulación de sus vientos por lo que alcanza la categoría de tormenta tropical.

Allison cruzó por el Canal de Yucatán durante la tarde y la noche del 3 para salir al golfo de México en la madrugada del 4, registrándose en ese momento una presión mínima en el organismo de 997 hPa. En la estación meteorológica Isabel Rubio se reportó una racha máxima del viento de componente Sur de 70 km/h.

Mientras Allison se movía casi al Norte por el Canal de Yucatán, la actividad de tormentas y lluvias, que en el momento de ser aún depresión afectaba sólo al occidente de Cuba, se fue extendiendo al Este y durante la noche del 3 y la madrugada del 4 llegó a cubrir casi todo el país, con un incremento de la humedad al tomar los vientos componente Sur en los dos tercios occidentales, con velocidades entre 30 y 40 km/h, los cuales llegaron a alcanzar valores superiores a los 60 km/h en el estrecho de la Florida. El oleaje comenzó a aumentar en la medida que se iba organizando la actividad convectiva, con la presencia de fuertes conglomerados nubosos, donde se registraron alturas de las olas en la zona del disturbio entre 3 y 4 m de forma similar a lo encontrado en otros casos de ondas tropicales estudiadas con anterioridad (Sosa et al, 1996).

En Pinar del río, las lluvias fueron torrenciales con totales entre 100 y 300 mm por día en el tiempo que duró la afectación de este organismo, con el mayor acumulado en San Diego de los Baños, al registrarse entre el 1° y el 4 un total de 456,4 mm y un máximo el 4 con 384,0 mm, provocando daños a las cosechas, no sólo en esta provincia sino en la región occidental de Cuba. También se reportaron afectaciones a 120 viviendas y la pérdida de 3 vidas humanas (Pérez et al, 1996). La tormenta alcanzó la categoría de huracán en la mañana de 4 mientras se mantenía el flujo del Sur sobre Cuba con nublados y precipitaciones. La máxima intensidad de la tormenta se alcanzó en la noche de ese día al descender la presión central hasta 987 hPa.

Los cálculos del campo de ola se empiezan a realizar desde el día 3 a las 1200 Z, cuando Allison era aún una depresión tropical y hasta el día 5 a las 1800Z, donde ya había alcanzado la categoría de huracán de moderada intensidad. En estos días se determinó no sólo el campo de olas sino la propagación del mismo en distintos rumbos, cuyos resultados aparecen en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de los cálculos del oleaje para el Ciclón Tropical Allison.

Clasificación	Fecha, Hora	Alt. de la ola de viento (m)	Alt. de la ola de propagación (m)	Distancia que alcanza la ola propagada. (km)
D.T Allison	3-6-95 ( 12z)	S.D.D 2.0	S.D.D 0.5 ( NNW)	368
		S.D.I 1.0	S.T.I 0.3 ( E )	368
		S.T.D 2.0		
		S.T.I 1.0		
T.T Allison	3-6-95 ( 18z)	S.D.D 3.0	S.D.D 1.7 ( NE)	368
		S.D.I 2.0	S.D.D 1.0 ( NE)	736
		S.T.D 3.2	S.D.D 0.8 (NE)	1104
		S.T.I 2.1		
T.T Allison	4-6-95 (00z)	S.D.D 3.0	S.D.D 1.8 (NE)	368
		S.D.I 2.0-1.0	S.D.D 1.2 (NE)	736
		S.T.D 3.0-2.0	S.D.D 0.8 (NE)	1104
		S.T.I 2.0-1.0		
T.T Allison	4-6-95 (06z)	S.D.D 3.0	S.D.D 2.0 (N)	368
		S.D.I 2.0	S.D.D 0.6 (N)	1104
		S.T.D 3.0	S.T.D 2.0 (SW)	368
		S.T.I 2.0-1.0	S.T.D 0.9 (SW)	1104
T.T Allison	4-6-95 (12z)	S.D.D 5.0-4.0	S.D.D 2.0 (WSW)	368
		S.D.I 3.0-2.0	S.D.D 0.8 (WSW)	1104
		S.T.D 4.0-3.0	S.D.I 1.2 (SSE)	276
		S.T.I 3.0-2.0	S.T.D 2.0 (NNE)	441
			S.T.I 2.5 (E)	368
			S.T.I 0.9 (E)	736
H. Allison	4-6-95 (18z)	S.D.D 6.0-5.0	S.D.D 3.3 (W)	368
		S.D.I 4.0-3.0	S.D.D 1.6 (W)	1104
		S.T.D 5.0-4.0	S.D.I 1.1 (NE)	618
		S.T.I 3.0-2.0	S.T.D 3.0 (NE)	398
			S.T.I 1.0 (NW)	574
H. Allison	5-6-95 (00z)	S.D.D 6.0-5.0	S.D.D 5.1 (N)	154
		S.D.I 4.0-3.0	S.D.I 2.1 (NE)	368
		S.T.D 5.0	S.D.I 0.9 (NE)	1104
		S.T.I 3.0	S.T.D 3.5 (SE)	298
			S.T.I 1.6 (NW)	596
H. Allison	5-6-95 (06z)	S.D.D 6.0-5.0	S.T.I 2.0 (NW)	673
		S.D.I 5.0-4.0		
		S.T.D 6.0		
		S.T.I 5.0-4.0		
H. Allison	5-6-95 (12z)	S.D.D 6.0-5.0	S.T.I 1.4 (NW)	706
		S.D.I 4.0-3.0		
		S.T.D 5.0-4.0		
		S.T.I 3.0-2.0		
H. Allison	5-6-95 (18z)	S.D.D 5.0	S.T.I 1.0 (NW)	368
		S.D.I 3.0-2.0	S.T.I 0.6 (NW)	736
		S.T.D 4.0		
		S.T.I 3.0-2.0		

Leyenda: S.D.D. Sector delantero derecho  
 S.D.I. Sector delantero izquierdo  
 S.T.D. Sector trasero derecho  
 S.T.I. Sector trasero izquierdo

Como se observa el oleaje comienza a incrementarse al organizarse el sistema en el Noroeste del mar Caribe. Luego de formado Allison las mayores alturas se alcanzaron en su categoría de huracán el día 5 a las 0600z con una altura máxima de 6.0 m en el sector delantero derecho e izquierdo. Este oleaje se propagó hacia la costa Norte occidental de Cuba con una altura de 2.0 m desde el Noroeste, generando marejadas sin que se produjeran inundaciones costeras. El viento de región Sur provocó además marejadas en la costa Sur occidental.

### Conclusiones

La génesis de Allison puede resumirse en:

1. Se produjo una gradual inclinación del eje de la onda en la altura hacia el Oeste inestabilizando la misma.
2. La formación temprana de una circulación ciclónica a 3 km de altura.
3. Fuerte cizalladura horizontal, influjo y convergencia en las capas bajas con difluencia superior.
4. La onda se desplazó hacia una zona de máxima temperatura superficial del mar.
5. Vorticidad positiva en 850 hPa sobre la zona en que se movía el disturbio.
6. Débil cizalladura vertical del viento zonal en la etapa previa a la intensificación del organismo.
7. Calentamiento gradual de la capa 500-200 hPa.
8. Disminución inicial de la temperatura en 700 hPa en la zona del disturbio con un incremento posterior en el momento de la intensificación.

Por otro lado, las precipitaciones asociadas a la onda afectaron casi todo el país y las mismas se incrementaron hacia el occidente de Cuba al alcanzar su estadio de tormenta tropical sobre el Canal de Yucatán y llegaron a ser torrenciales en Pinar del Río. Estas precipitaciones produjeron daños a cosechas y viviendas y la pérdida de 3 vidas humanas.

El oleaje sobre las costas cubanas en su etapa de onda no sobrepasó los 2.0 m de altura. Este oleaje se incrementa al organizarse el sistema en el Noroeste del mar Caribe. Luego de formado Allison las mayores alturas se alcanzaron en su categoría de huracán el día 5 a las 0600z con una altura máxima de 6.0 m en el sector delantero derecho e izquierdo. Este oleaje se propagó hacia la costa Norte occidental de Cuba con una altura de 2.0 m desde el Noroeste, generando marejadas sin que se produjeran inundaciones costeras.

El viento de región Sur provocó además marejadas en la costa Sur occidental.

### Agradecimientos

Deseamos manifestar nuestra gratitud al Dr. Rafael Pérez Parrado por facilitarnos el paquete de programas **METINFO** así como a los Lic. Jesús Dole Chávez y Caridad Iraola Ramírez y la técnica Mirna Hernández Gil por su ayuda en la aplicación de esos programas. De igual forma a la técnica Bárbara Pérez Castro por la confección de la figura mostrada en el trabajo.

### Referencias Bibliográficas

- Avila, L. (1990): Atlantic tropical systems of 1989. *Mon Wea. Rev.* 118(5), 1178-1185.
- Ballester, M.; C. González; L. Heredia; I. Mitrani; R. Pérez et al (1990): Dinámica y estructura de los ciclones tropicales y su interacción con el medio circundante. Informe Final del Tema 421.01 Inst. de Met. (UDICT), 252 pag.
- Dina, F. (1991): Comportamiento de algunas magnitudes termodinámicas durante el surgimiento y evolución de los ciclones tropicales. Trabajo de Diploma de la Fac. De Física de la U. de La Habana, 44 pag.
- Hawkins, H.F. y D.T. Rubsam (1968): Hurricane Hilda, 1964. Genesis as related by satellite photographs, conventional and aircraft data. *Mon. Wea. Rev.* 96, 428-452.
- Peñate A. (1990): Desarrollo de un método objetivo de diagnóstico y pronóstico del campo de ola en los mares adyacentes a Cuba Tesis de doctorado. 136 pp.
- Pérez, R.; M.E. Sardiñas; M. Ballester y C. González (1996): Análisis de la temporada ciclónica 1995. Sistema Nacional de Vigilancia del Clima. Reporte Técnico No.2, Inst. De Met, 15 pag.
- Riehl, H. (1945): Waves in the easterlies and the polar front in the tropics. Dept. Met. Univ. Of Chicago. Misc. Report. No. 17.
- Sosa, M.(1995): Climatología y pronóstico de las ondas tropicales en Cuba. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctora en Ciencias Meteorológicas, Ciudad de La Habana, 109 pag.
- ; A. del Sol; A. Rodríguez y E. García (1996): "Caracterización y pronóstico de las ondas tropicales en el mar Caribe". Informe Final del Resultado (UDICT), Inst. Met., Ciudad de La Habana, 155 pag.
- O.M.M. (1988); Guía para el análisis y pronóstico de las olas. OMM 702, Cap 3 (1-51)

## Origen y Evolución de los ciclones tropicales bajo la influencia de los frentes fríos.

*Dr. Eugenio Mojena López., Ing. Carlos M. Góngora González., Met. Antonia Ortega González,  
Lic. Julia Leyva Santos.*

*Instituto de Meteorología. Casa Blanca. Ciudad Habana.*

*Fax: (537) 338010*

*Email: Meteoro @ ceniai.cu*

**RESUMEN:** El presente trabajo hace un análisis de las transformaciones que sufren los frentes fríos en su desplazamiento sobre la zona tropical, el surgimiento de las bajas tropicales en su cola y las zonas ciclogénicas del Atlántico vinculadas a este proceso. Se analiza el mecanismo probable que da origen a dichas bajas. Se hace un análisis pormenorizado de las depresiones, tormentas y huracanes originados por este mecanismo, por zonas y meses.

**ABSTRACT:** The present work is an analysis of the transformations that occur to cold fronts in its displacement in the tropical zone, the emergence of tropical low in its tail, and cyclogenetic zones of Atlantic linked to this process, the probable mechanism of the origin such low. Is analyzed also, an analysis of the depressions, storms and hurricanes originated by this mechanism, by zones and months, is presented.

### Introducción

Los procesos de interacción entre latitudes medias y bajas pueden jugar un papel importante en el tiempo y el clima de determinadas regiones, llegando incluso a ser una característica esencial de los mismos. Bajo determinadas condiciones la corriente superior del oeste de latitudes medias puede cambiar de régimen zonal a meridional irrumpiendo en los trópicos, generando una extensa vaguada que puede penetrar profundamente en bajas latitudes. Este proceso a su vez está acompañado de gran transporte de humedad y nubosidad desde los trópicos hacia latitudes medias. Esto hace que determinados sectores de la zona tropical se encuentren bajo la influencia del oeste durante un periodo del año y en otros bajo condiciones típicamente tropicales.

En esta región los frentes fríos incursionan frecuentemente, principalmente en el invierno o periodo poco lluvioso de la zona tropical. Estos sistemas mantienen una apariencia similar a los de latitudes medias, pero en muchos casos el gradiente de temperatura superficial es tan débil que cuando se desplazan lentamente o se estacionan sobre los océanos tropicales este prácticamente desaparece. En su desplazamiento al sur sobre los océanos calientes tropicales comienzan un caldeoamiento de su capa adyacente al suelo de la masa de aire frío, a la vez que se carga de humedad.

Si recordamos que la intensidad frontal "I" se expresa como:

$$I = g \frac{T^* - T}{T_m} \quad \text{cuando: } T \rightarrow T^* \text{ entonces } I \rightarrow 0.$$

g es la aceleración de la gravedad y el asterisco está referido a la masa de aire caliente.

De igual forma con el aumento de la temperatura y del enriquecimiento del aire frío en humedad las densidades de las masas de aire frío (polar) y tropical tienden a igualarse y acorde con la fórmula de Margulles para la pendiente frontal:

$$T_{\theta} = \frac{\partial P / \partial X - \partial P' / \partial X}{g(\rho - \rho')} \quad \rho \rightarrow \rho'$$

$T_{\theta} \rightarrow \infty$  condición que se corresponde con una superficie de división vertical, lo que es imposible pues nunca se alcanzaría el equilibrio.

En el campo de presión las transformaciones son mas lentas y se mantiene la condición:

$$\partial P / \partial X - \partial P' / \partial X > 0$$

a lo largo de una línea de discontinuidad del viento:  $V_y > V_y'$  con cizalladura ciclónica, denominada línea de deslizamiento lateral. Delante de la línea de deslizamiento lateral la profundidad de la capa húmeda se incrementa rápidamente disminuyendo detrás de la misma. Se observa además convergencia en la línea y a corta distancia de su parte delantera.

En lo referente a la nubosidad y la lluvia asociada a este sistema es uno de los más importantes en la zona tropical. Cuando la cizalladura es lo suficientemente intensa, tormentas, lluvias intensas y una extensa cubierta nubosa acompañan a la línea de deslizamiento, extendiéndose estos fenómenos por delante de la línea de cambio del viento. Las condiciones meteorológicas mejoran después del paso de la línea, alcanzándose los valores mínimos de la nubosidad y las precipitaciones dentro del núcleo de altas presiones donde el tiempo es mejor que los normal.

La presencia de los frentes fríos en los trópicos está representada por regla general por su sector sur, es decir por el sector del frente que se encuentra fuera de la influencia de los ciclones extratropicales. Este sector está sometido como se analizó con anterioridad a un fuerte calentamiento en sus niveles bajos, en el que intervienen todos los procesos, conducción, radiación e intercambio turbulento, pero este proceso no puede extenderse a todos los niveles de la troposfera manteniéndose en los niveles medios la estructura frontal, esto traería como consecuencia una especie de burbuja de aire caliente introducida dentro de una masa de aire frío en la cola del frente.

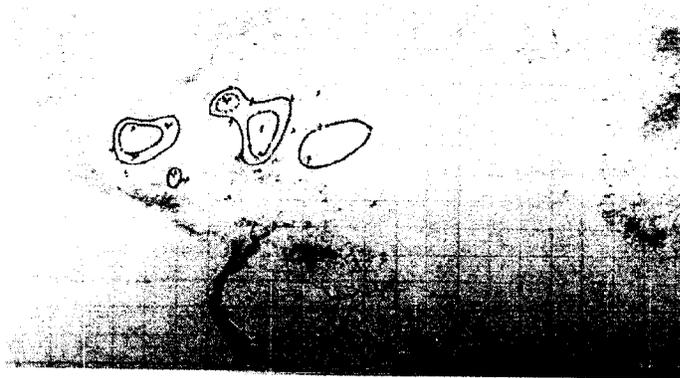
### **Región de surgimiento de los ciclones tropicales por influencia de los frentes fríos.**

Existen diferencias en la distribución de la zona ciclogénica sobre el Atlántico norte cuando analizamos la ciclogénesis tropical como un proceso general, sin especificar el o los mecanismos que dieron origen a estos procesos y cuando se analiza la ciclogénesis tropical producida bajo influencia de los sistemas frontales como un caso específico. Lo primero que se aprecia al estudiar la zona ciclogénica a través de este proceso, es que no aparecen áreas ciclogénicas como tal más allá del meridiano 55 oeste, y en un segundo lugar un corrimiento al norte de las áreas ciclogénicas climatológicamente establecidas.

En cuanto a los resultados por nosotros obtenidos nos es imposible hacer algún tipo de comparación con otros autores, pues no hemos encontrado en toda la bibliografía revisada, ni en citas de otros autores referencia alguna a un estudio de este tipo.

Para la determinación de la zona ciclogénica fueron revisadas 21 temporadas ciclónicas que abarcan el período 1964-1984. Durante el mismo fueron detectados 56 bajas tropicales formadas bajo la influencia de sistemas frontales, casi la totalidad de estos sistemas se desarrollan en las colas de los sistemas frontales.

Una vez determinada la muestra fueron ploteados sobre una carta del tiempo, las posiciones de los cuerpos de circulación ciclónica al momento de su formación. La frecuencia de ocurrencia de organismos tropicales fue analizada para cuadrados de 5° de latitud y 5° de longitud, así se formaron cuatro regiones de surgimiento de ciclones tropicales, **Bermudas-Bahamas, Golfo de México, Golfo de Honduras y nordeste de las Antillas Menores.** (Fig.1)



**Fig. 1.** Regiones de surgimiento de los ciclones tropicales bajo la influencia de los frentes fríos.

#### **Bermudas-Bahamas.**

Esta zona ciclogénica abarca la zona comprendida entre las Bahamas orientales y Las Bermudas, donde se observa la mayor frecuencia de organismos tropicales, y se extiende en forma de cuña hacia el noroeste hasta el Saco de Charleston donde aparece un máximo secundario. Esta zona produce bajas tropicales que no alcanzan estadios superiores, se desarrolla en los meses de: Abril, Mayo, Junio, Septiembre, Octubre y Noviembre. Siendo los meses de Mayo y Octubre los más activos con un 11,4 % respectivamente del total de bajas del Atlántico. En esta región todas las depresiones que se forman transitan en la fase de tormenta. Es activa en los meses de Agosto, Septiembre, Octubre; observándose su período más activo en Septiembre con un 33,3 % de las tormentas que se forman en este mes seguido por Octubre con un 22,2 %. En este mismo período alcanzan su mayor producción de huracanes, Septiembre es el más activo con el 37 % seguido de Octubre con el 25 %.

En conjunto esta zona ciclogénica produce el 37 % de las bajas tropicales, el 25 % de las depresiones, 66,6 % de las tormentas tropicales y el 62 % de los huracanes. A diferencia del Golfo de México, esta zona ciclogénica se continúa hacia el este y al nordeste con el resto del Atlántico. Siendo las trayectorias típicas de estos sistemas al nordeste, muchas de las depresiones viven el tiempo suficiente sobre el océano para alcanzar la fase de tormenta tropical y estas a su vez alcanzan la categoría de Huracán.

#### **Golfo de México.**

Esta zona ciclogénica abarca principalmente la mitad noroeste del área observándose la mayor frecuencia de formación de bajas tropicales en su extremo noroeste. Esta zona es productora de bajas tropicales que no alcanzan su desarrollo ulterior en los meses de Abril,

Mayo, Septiembre, Octubre y Noviembre siendo Septiembre el más activo con un 11,4 % del total de bajas formadas en el Atlántico. El mes de Septiembre es muy activo en la formación de depresiones con un 75 % del total, en tormentas tropicales este mes produce el 33,3 % del total del Atlántico, no obstante el mes de Agosto es el mes más activo en la producción de huracanes con un 12,5 %. En conjunto el Golfo produce el 28,5 % de las bajas tropicales, el 75 % de las depresiones, el 33,3 % de las tormentas y el 20 % de los huracanes. La característica principal de esta zona es la alta producción de depresiones, esto se debe a que esta zona es también altamente prolifera en la formación de bajas, las que alcanzan con rapidez la fase de depresión. Sin embargo las características geográficas de esta zona ciclogénica y las trayectorias de estos sistemas, limita considerablemente el tiempo de vida de los mismos sobre las aguas del Golfo, por lo que muchas depresiones no alcanzan los estadios superiores de desarrollo. Esta hace que la producción de huracanes caiga ostensiblemente en esta región.

#### **El Golfo de Honduras.**

Esta zona ciclogénica se encuentra en una latitud mucho más baja que las zonas antes analizadas y por ende a diferencia de estas zonas en que los frentes fríos se presentan durante todos los meses del año en el Golfo de Honduras la posibilidad de formación de bajas tropicales esta supeditada a los meses de irrupción de los frentes fríos en el Mar Caribe Occidental. Esta zona produce bajas tropicales que no se desarrollan en el mes de Mayo con 8,5 % del total de bajas para el Atlántico, es activo en cuanto a la producción de depresiones en el mes de Octubre con un 25 % y produce el 10 % de los huracanes del Atlántico en los meses de Septiembre y Octubre respectivamente.

#### **Nordeste de las Antillas Menores.**

Esta zona se extiende al nordeste de Puerto Rico y al norte y nordeste del grupo norte de las Antillas Menores. Si restringimos nuestro criterio estrictamente a los resultados del análisis de la muestra, la misma no debía ser considerada como una zona ciclogénica, pues en la misma en el periodo analizado no se observa la formación ni siquiera de las primeras fases del ciclón tropical (depresión tropical), no obstante en esta zona se producen bajas tropicales en la cola de los frentes fríos que pueden ser consideradas como el disturbio preexistente para la formación del ciclón tropical, y por tanto es potencialmente posible la ocurrencia de ciclones tropicales a través de este mecanismo en dicha zona. Esta zona es activa en cuanto a la producción de bajas en los meses de Mayo, Junio, Septiembre, Octubre y Noviembre, siendo el periodo más activo de la misma en el mes de Octubre con el 8,5 % de las bajas. En su conjunto esta zona produce el 22,5 % de las bajas del Atlántico. (Ver Tab.1)

	Baja Tropical	Depresión	Tormenta	Huracán
Ber- Bahamas	37	25	66,6	70
Golfo México	28,5	75	33,3	20
Golfo Honduras	11,4	-	-	10
Norte A.Menores	22,8	-	-	-

**Tab.1.** Muestra el porciento de Bajas tropicales, Depresiones, Tormentas tropicales y Huracanes formados por la influencia de frentes fríos en cada una de las zonas ciclogénicas.

Otras características de las zonas ciclogénicas en su conjunto se observan en la Tab.2.

	Abril	Mayo	Junio	Agosto	Sept.	Octubre	Nov.
Bajas	5,7	25	8,5	-	20	31,4	8,5
Depres.	-	-	-	-	75	25	-
Torm.	-	-	-	11	66.6	22	-
Hurac.	-	-	-	12	50	37	-

**Tab.2.** Muestra los porcentajes de Bajas, Depresiones, Tormentas tropicales y Huracanes en el Atlántico Norte por meses.

### Características de los frentes fríos que producen ciclones tropicales

Los frentes fríos que tienen la posibilidad potencial de producir ciclones tropicales, afectan las zonas de estudio en diferentes meses del año:

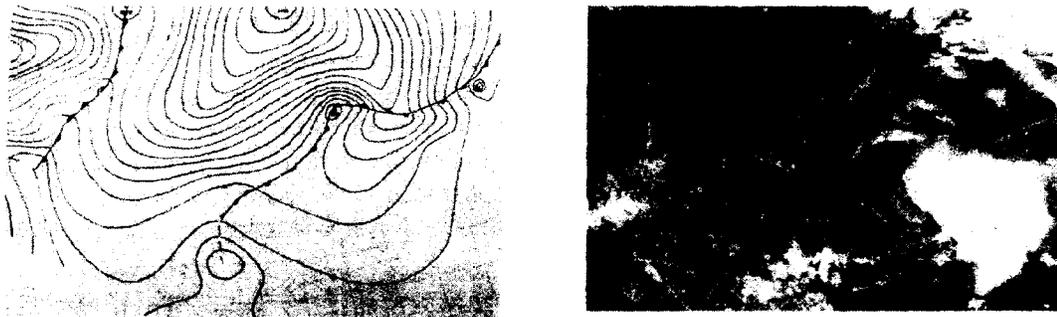
1. **Bermudas-Bahamas:** Abril, Mayo, Junio, Agosto, Septiembre, Octubre y Noviembre. Produciendo en esta zona depresiones, Tormentas y huracanes en Agosto, Septiembre y Octubre.
2. **Golfo de México:** Abril, Mayo, Agosto, Septiembre, Octubre y Noviembre. Produciendo en esta zona depresiones, perturbaciones y huracanes en Agosto y Septiembre.
3. **Golfo de Honduras:** Mayo, Junio, Septiembre y Octubre. Produciendo en esta zona depresiones, perturbaciones y huracanes en los meses de Septiembre y Octubre.
4. **Norte de las Antillas Menores:** Mayo, Junio, Septiembre, Octubre y Noviembre; pero las bajas tropicales aquí formadas no alcanzan la fase superior de desarrollo.

Los frentes productores de ciclones tropicales se caracterizan por desplazamientos muy lentos durante las últimas horas precedentes a la formación de la baja tropical de forma tal que la condición de casi estacionario en el área de formación de la baja en las últimas 24 horas puede considerarse de gran importancia en este mecanismo de ciclogénesis. La estructura del campo nuboso asociado a estos frentes pueden variar ostensiblemente de un frente a otro pudiendo variar desde bandas fragmentadas y poco activas caracterizadas por tonos grises en espectro Infrarrojo hasta bandas más o menos compactas donde se observan números de celdas de actividad convectiva intensa.

El proceso de formación de la baja tropical esta representado en el campo barico por un débil centro de bajas presiones con una isobara cerrada y vientos muy débiles no organizados, se aprecia en las imágenes de satélite de espectro visible e infrarrojo como un ensanchamiento en la cola del frente acompañado de un incremento de la actividad convectiva con formación de nubes del tipo cumulonimbos con una extensa salida de cirros, lo que se refleja como un deterioro de las condiciones meteorológicas. Conjuntamente con esté comienza un estrangulamiento de la banda nubosa en el sector inmediatamente al norte del ensanchamiento en el extremo sur del frente, este proceso puede llevarse a cabo en dos formas:

- 1- estrechamiento continuo de la banda y ruptura.
- 2- estrechamiento y levantamiento del sector al norte de la baja.

El final de este proceso es por regla general la separación del centro circulatorio de la banda frontal, esto se produce en la medida en que la presión disminuye y los vientos se intensifican, aunque hay casos en que el sistema por largo período enlazado a la banda frontal. (Ver Fig.2)



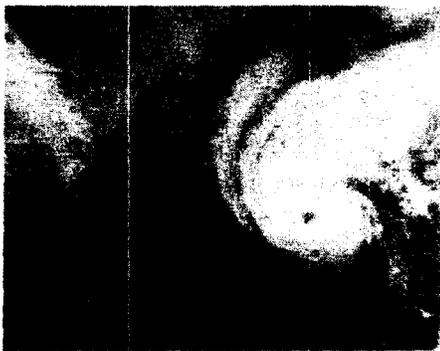
**Fig.2.** Muestra el mapa de superficie del día 31/10/81 a las 1200 utc (día de formación de la baja) y la imagen del satélite correspondiente al Huracán Katrina del NOAA-7 del 5/11/81.

### **Ciclones tropicales formados por frentes fríos.**

Se ha podido determinar que bajo la influencia de los sistemas frontales aparecen dos procesos diferentes que llevan a la formación de un ciclón tropical:

1. Ciclón formado en la cola de un sistema frontal casi estacionario o de movimiento muy lento.
2. Ciclón tropical formado por transformación de una baja extratropical formada previamente en el frente.

En ambos casos estos sistemas pueden mantener la apariencia de ciclones extratropicales con indicativos frontales, es decir su patrón nuboso mantiene en gran medida la estructura del ciclón extratropical.



También en estos organismos aparecen indicativos que lo diferencian de un ciclón tropical típico como es un ojo enorme y desgarrado: tal es el caso de "Josephine", formado en Octubre de 1984 en el Atlántico ( Fig.3.) cuyo ojo tuvo un diámetro aproximado de 115 km, magnitud esta no común en un ciclón tropical. En el aire superior en muchos casos estos sistemas permanecen estructurados dentro de una onda de los oestes, pudiendo ser semejante a una baja del tipo cutt-off.

**Fig.3.** Muestra la imagen del NOAA-7 (11/10/1984) del huracán "Josephine" donde se observan las particularidades de su ojo.

### **Criterio de formación de los ciclones tropicales en la cola de los frentes fríos.**

Las primeras ideas relacionadas con el mecanismo que podía dar origen a las bajas tropicales en la cola de los frentes fríos estuvieron encaminadas a la búsqueda de su origen en perturbaciones ondulatorias en la superficie frontal que evolucionaban en este sentido,

apartándose de su evolución normal, que debía concluir en la formación de un ciclón extratropical. Estas ideas fueron más tarde abandonadas bajo la premisa de que precisamente en el sector sur del frente, debido a la modificación de la masa de aire frío que lo acompaña y la desaparición consecuente del contraste térmico, se destruye la superficie frontal perdiendo sentido dicha idea. La destrucción del frente como tal es producto del calentamiento superficial que experimenta la masa fría a su paso sobre las aguas calientes del Atlántico tropical. Por tanto este proceso se produce en la capa superficial, es decir, el contraste térmico se destruye en los niveles más bajos de la troposfera, pero el frente frío permanece en la altura. Conjuntamente con esto, la cizalladura del viento permanece durante un largo periodo.

El calentamiento del aire en los bajos niveles crea una especie de bolsa o almohada de aire caliente dentro de la masa fría, dando origen a las fuerzas de Arquímedes o flotabilidad del aire necesaria (inestabilidad convectiva) para el levantamiento del aire caliente dentro de la masa fría. Esta corriente ascendente se produce dentro de una zona de fuerte cizalladura horizontal ciclónica del viento, por lo que esta parcela del aire puede verse forzada a rotar bajo la influencia de dicha cizalladura, efecto este que sería reforzado por la componente vertical del parámetro de Coriolis, dando origen a un centro circulatorio de bajas presiones no formado por un proceso ondulatorio.

### **Conclusiones**

El análisis de la muestra arroja la existencia de 4 zonas ciclogénicas: dos zonas grandes productoras de organismos tropicales ( Bahamas , Bermudas y Golfo de México ), una zona pobre en el Caribe Occidental ( Golfo de Honduras ), y una en el nordeste de Las Antillas Menores donde las bajas no transitan a estadios superiores .

La pobreza de la zona del Golfo de Honduras se debe a una tendencia marcada a la destrucción de los frentes mucho antes de penetrar en esta zona , desapareciendo inclusive las líneas de deslizamiento lateral , lo que crea las condiciones propicias en las zonas del Golfo de México, resultando de gran interés para esta región.

### **Bibliografía**

Mojena E . Tesis de Doctorado , Academia de Ciencias de la República de Bulgaria , Sofía 1987 .

## **Penetraciones del mar en el litoral norte occidental de Cuba provocadas por el huracán "Gordon".**

*Acacia del Sol Hernández, Lázara Díaz Maqueira y Marina Sosa Hurtado.  
Instituto de Meteorología, CITMA*

**RESUMEN:** El huracán "Gordon" produjo inundaciones costeras por penetraciones del mar en la costa noroccidental de Cuba durante cuatro días consecutivos. En este trabajo, se estudian las principales causas de los vientos y el oleaje generado por este ciclón, tanto cuando estuvo lejos como cuando estuvo próximo a la zona afectada.

**ABSTRACT:** Coastal floods by sea water invasion on Cuba's northwestern coast were produced by hurricane "Gordon" during four consecutive days. The principal causes of generated winds and waves associated to this cyclone are studied in this paper, both when it was located far from and near of the area.

### **Introducción**

El huracán "Gordon", tuvo su origen en la tarde del 8 de noviembre de 1994 en un área de disturbio que permaneció varios días sobre el Suroeste del mar Caribe, al formarse la duodécima depresión tropical de esa temporada. El día 10, alcanzó la categoría de tormenta tropical, se movió al Nordeste cruzando sobre Jamaica y el extremo oriental de Cuba. Posteriormente, se movió al cuarto cuadrante sobre el estrecho de la Florida, al Norte de Cuba, mientras perdía temporalmente parte de sus características tropicales. En esta etapa fundamentalmente, el sistema de vientos de este organismo generó fuertes marejadas y penetraciones del mar, por espacio de cuatro días consecutivos, en la costa Norte occidental de Cuba, incluido el Malecón habanero, las cuales fueron calificadas de ligeras. En este trabajo, se analizan algunas características de la circulación general y su influencia en el comportamiento anómalo de este organismo, así como los factores que incidieron en estas prolongadas penetraciones del mar.

### **Materiales y métodos**

Se consultaron los mapas isobáricos y del campo de olas, los de topografía bórica, las imágenes de los satélites meteorológicos, así como, otras informaciones confeccionadas por el Instituto de Meteorología, de los días en que surgió y se desarrolló este organismo tropical, incluido los Boletines Especiales que se confeccionaron en este período de tiempo.

### **Resultados**

Al surgir la depresión tropical que diera posteriormente origen al huracán "Gordon", la misma aparecía muy bien representada en los niveles bajos y medios de la troposfera con una circulación cerrada; en los niveles altos se observaba cierta difluencia. Mientras esta depresión permanecía casi estacionaria sobre la costa Este de Nicaragua, se le superpone un

exflujo anticiclónico difluente en el nivel de 200 hPa, el cual favorecía el desarrollo convectivo del sistema. Sin embargo, a partir del día 10 cuando alcanza la categoría de tormenta tropical, aunque permanece la difluencia superior, los vientos del Oeste pierden en latitud y un chorro subtropical comienza a cruzar por el Norte del sistema mientras toda la convección asociada al organismo se ve desplazada al Este al ser cizallada por un flujo del Oestesuroeste en niveles altos.

“Gordon” comienza a moverse al Este, al Sur de Cuba, embebido en esos vientos del Oeste, los cuales están presentes a partir de los 5 km. de altura, observándose además la presencia de un sistema anticiclónico migratorio en 700 hPa que cubría el Sudeste de Estados Unidos, todo el Golfo de México y México, el cual impedía que el ciclón ganara en latitud.

Luego de avanzar sobre Jamaica y el extremo oriental de Cuba, “Gordon” se profundiza y ya aparece representado hasta los 7 km. de altura. Su presión central mínima es de 997,0 hPa y los vientos máximos de 86 km./h. En esos momentos, tanto el patrón nuboso como el campo de vientos en la superficie se asemeja a un ciclón subtropical. De esta forma, las mayores velocidades del viento comienzan a aparecer en la periferia del ciclón y no en el anillo que rodea al centro del mismo. Estos vientos fuertes en la periferia, que comienzan a afectar el occidente de Cuba, eran resultado del incremento del gradiente de presión en la superficie producido por la combinación del extenso campo bórico asociado a “Gordon” y un anticiclón que se situaba al Norte del organismo. Es por eso, que estando muy distante de La Habana, se registran en la estación Casa Blanca vientos del orden de los 40 km./h, con rachas de 78 km./h de dirección Norte el día 14. Estos fuertes vientos, producen marejadas en toda la costa Norte occidental de Cuba y se inician penetraciones del mar en zonas bajas, incluido el Malecón habanero, las cuales fueron calificadas de ligeras.

El movimiento de “Gordon” de Este a Oeste, próximo al litoral Norte de Cuba permitió que los vientos asociados al sector izquierdo de este sistema, de componente Nordeste y Norte, fueran generando marejadas sobre el tramo costero, las que se incrementaron a medida que los vientos giraban al Noroeste, manteniendo velocidades del orden de los 40 km./h, los cuales incidían entonces perpendicularmente a la costa, por la propia inclinación de la misma. Esta situación provocó altura en las olas combinadas de cuatro metros, dando inicio a las inundaciones costeras por penetraciones del mar el día 14.

En la mañana del 15, “Gordon” comienza a moverse en un rumbo próximo al Noroeste con vientos máximos del orden de los 80 km./h, cruzando el estrecho de la Florida para situarse en la tarde al Oeste de cayo Hueso (Fig. 1).

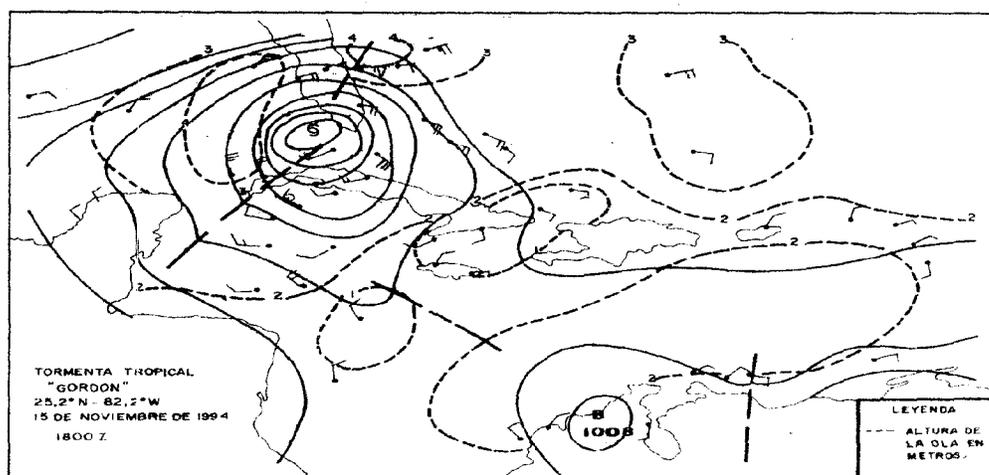


Fig. 1 Situación meteorológica correspondiente al 15 de noviembre de 1994 a las 1800Z.

Según Avila y Rappaport (1996), durante este tiempo se notó una falta de convección profunda cerca del centro y los vientos más fuertes se registraron fuera del mismo, mientras que los datos de los radiosondeos indicaban que el núcleo del sistema estaba frío, a excepción de la porción Este de la circulación, donde el aire cálido de la troposfera media todavía prevalecía. De esta forma, los vientos de región Noroeste siguen afectando a Pinar del Río pero, aunque en las provincias habaneras los vientos han girado al Suroeste con la nueva posición del ciclón, el núcleo de 4m de altura sigue muy próximo a esa costa y nuevos trenes de ola mantienen las ligeras penetraciones del mar.

En estos momentos, la velocidad de traslación del sistema ha disminuido y sobre las cálidas aguas del golfo de México vuelve "Gordon" a tropicalizarse, donde es notado un calentamiento en la troposfera media cerca del centro del ciclón (Avila y Rappaport, 1996).

En la mañana del día 16, la tormenta inicia un movimiento al Nortenordeste y penetra en la Florida por el Sur y cerca de Fort Myers. Con este movimiento, se incrementan las posibilidades de penetraciones del mar en zonas bajas del litoral Norte occidental, pues han aparecido vientos fuertes del Noroeste en la porción Sudeste del golfo de México del orden de los 55 km/h. Estos vientos mantenían muy próximo a nuestras costas alturas de olas de unos 4 metros.

La velocidad de traslación se incrementa al cruzar la Florida y su centro se va alejando de Cuba, por lo que la velocidad de los vientos disminuye. Sin embargo, el mar de leva generado por el ciclón tropical, unido al mar de viento que ha seguido produciéndose en la zona, mantenían las penetraciones del mar en la costa Norte occidental de Cuba.

Cuando "Gordon" sale al Atlántico el día 17, alcanza la categoría de huracán con vientos máximos del orden de los 120 km/h. Su extensión horizontal sigue siendo grande y los vientos, aunque más débiles, siguen soplando con componente Norte (Fig. 2 y 3), por lo que aun este día se registran penetraciones del mar.

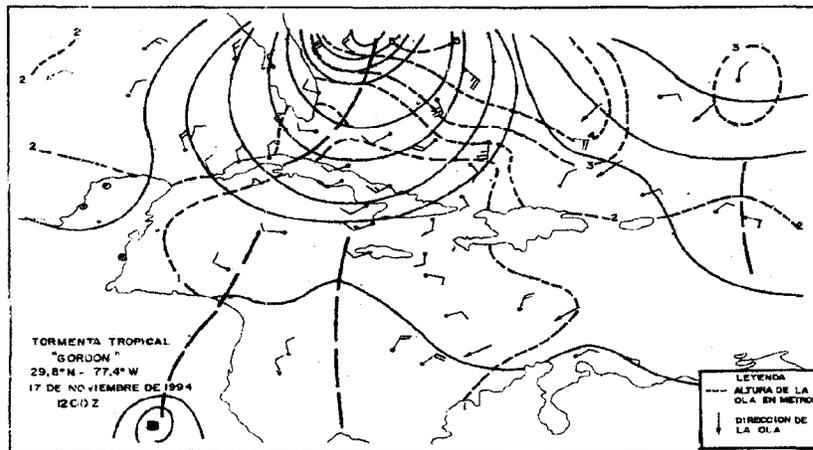


Fig. 2 Situación meteorológica correspondiente al 17 de noviembre de 1994 a las 1200Z.

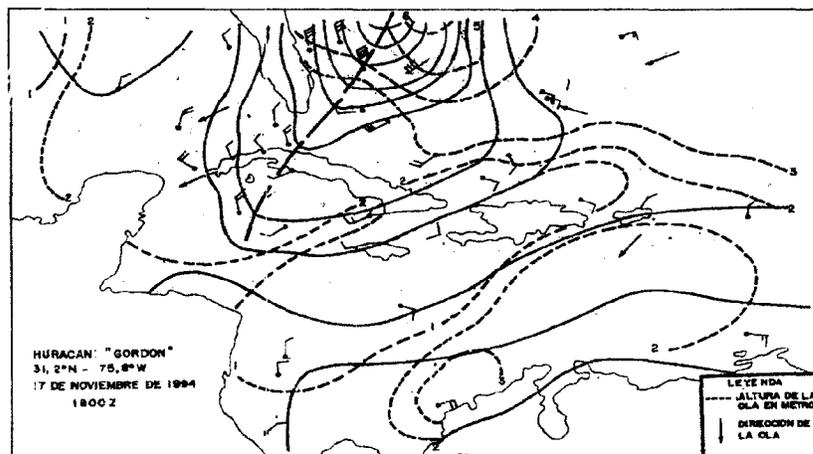


Fig. 3 Situación meteorológica correspondiente al 17 de noviembre de 1994 a las 1800Z.

Para que un ciclón tropical produzca penetraciones del mar en esta zona del país, tienen que cumplirse condiciones específicas, éstas son:

- 1.- La incidencia sobre la mitad oriental del golfo de México y el estrecho de la Florida de vientos de región Noroeste con velocidades iguales o superiores a 40 km./h por un espacio de tiempo superior a 12 horas.
- 2.- La zona de máximo oleaje debe ser de 4 m o más de altura en la mitad oriental del golfo de México y el estrecho de la Florida con vientos iguales o superiores a 55 km./h. Las olas deben desplazarse posteriormente en la misma dirección del viento en que fueron generadas y llegar hasta la porción Norte occidental de Cuba.
- 3.- La surgencia que pueda provocar el ciclón y la marea barométrica (pleamar).
- 4.- Sobreelevación del nivel del mar por apilamiento en la línea de costa.

Deberá tenerse en cuenta además, que las características físico geográficas de este tramo de costa han sido modificadas por la mano del hombre, sobre todo en el Malecón habanero, por lo que la ola sufre una transformación mayor, ya que el agua experimenta dos niveles de sobre

elevación en presencia de fuertes marejadas: antes de la zona de rompiente y otro entre la zona de rompiente y el muro.

La duración e intensidad de las penetraciones dependerá de los valores que alcancen los factores de generación del oleaje y la conjugación de las condiciones señaladas anteriormente.

El comportamiento y trayectoria de "Gordon" próximo a la costa Norte de Cuba, originó penetraciones del mar en zonas bajas del occidente, incluyendo el Malecón habanero que, aunque ligeras según la tabla de clasificación de intensidades (Pérez et al, 1994), duraron cuatro días consecutivos lo que mantuvo una expectativa y preocupación constantes. No se cuenta con antecedentes en nuestros archivos de otra situación meteorológica que haya dado origen a penetraciones del mar por tantos días consecutivos.

El conocimiento adquirido mediante las tipificaciones de las situaciones meteorológicas que producen las inundaciones costeras por penetraciones del mar en esta zona de estudio y que se encuentra registrado en la cronología realizada desde 1970 hasta la fecha (Pérez et al, 1994), permite analizar las causas de la ocurrencia de este evento y a su vez, incorpora a la misma elementos que deben ser objeto de continuo análisis y estudio para su predicción en futuras situaciones meteorológicas análogas.

Es bueno señalar, que estas penetraciones no llegaron a alcanzar una mayor magnitud, debido a que los vientos no sobrepasaron los 55 km./h en el Sudeste del Golfo, ni en el estrecho de la Florida, lo mismo cuando "Gordon" se comportó como subtropical como al tropicalizarse de nuevo. Estos vientos nunca generaron alturas de ola superiores a los cuatro metros al permanecer poco tiempo al Norte de esta zona.

### **Conclusiones**

Se registra por primera vez la ocurrencia de cuatro días seguidos con penetraciones del mar en la costa Norte occidental de Cuba. Esto fue provocado inicialmente, por un fuerte gradiente bórico en la zona debido al comportamiento en ese momento de este organismo como si fuera un ciclón subtropical, con las mayores velocidades de viento en la periferia y no por la cercanía del centro a la región afectada, como es común que ocurra en esos casos. Más tarde, al aproximarse el centro al lugar y moverse sobre el estrecho de la Florida, aunque los vientos en el Oeste de Cuba eran débiles, las máximas velocidades del viento se presentan sobre el Sudeste del golfo de México donde generaron olas hasta 4 m de altura.

Cuando "Gordon" se vuelve a comportar como un ciclón tropical y se desplaza al Nortordeste sobre la Florida y el Atlántico adyacente, se intensifica volviendo a girar los vientos en el occidente al cuarto cuadrante, manteniendo las penetraciones ligeras en esa zona.

El caso que se ha estudiado, sin dudas complejo y con un comportamiento y trayectoria anómalos, ha pasado a formar parte de la cronología de penetraciones del mar en el litoral Norte de Cuba, como un caso poco común el cual ha enriquecido nuestro saber al respecto.

### **Agradecimientos**

Deseamos manifestar nuestra gratitud a Bárbara Pérez Castro por los dibujos confeccionados para el trabajo.

### **Referencias Bibliográficas**

Avila, L.A. y E.N. Rappaport (1996): Atlantic hurricane season of 1994. Mon. Wea. Rev. 124 (7), 1558-1578.

Pérez, P.J.,Díaz L., Del Sol A. ( 1994): Análisis Hidrometeorológico y Estadístico de las Penetraciones del Mar ocurridas en el Malecón habanero. INSMET, 53 pag.

## CALCULO DE ALGUNOS PARAMETROS DEL OLEAJE QUE HA AFECTADO A BARACOA POR CICLONES TROPICALES.

*N. Hernández, O. Alvarez, R. Casals, P. Beauballet .  
Instituto de Meteorología, Cuba*

**RESUMEN:** La ciudad de Baracoa es vulnerable a toda oscilación no periódica de las aguas del mar, las cuales son producidas por frentes fríos, anticiclones fuertes, ciclones extratropicales y tropicales. De estos últimos fenómenos se analizó una muestra de 122 años para determinar los organismos ciclónicos tropicales que han afectado la porción más oriental de Cuba y que pasaron a una distancia de hasta 300 kilómetros (160 millas náuticas), tomando como punto central la ciudad de Baracoa. Se procesó la base de datos creada a tal efecto mediante la correlación de los grupos de variables independientes y dependientes, estableciéndose las ecuaciones de regresión múltiple mediante las cuales se estiman la altura de la ola significativa, la altura de la mar de leva, el tiempo de recalada de la marejada a la costa y el tiempo de afectación en Baracoa.

**ABSTRACT:** Baracoa city is vulnerable to any non - periodic oscillation of the sea surface. This is produced by cold fronts, strong anticyclones, extratropical and tropical cyclones. It was analyzed a 120 year - long sample to determine what hurricanes have passed 300 kilometers (160 nautical miles) near Baracoa, eastern tip of Cuba. Database created for working was processed by means of multiple regression equations, by which significant wave height, swell height, seas arrival time to Baracoa and seas affectation time could be estimated.

### INTRODUCCION.

Se entiende que un ciclón tropical afecta la ciudad de Baracoa cuando pasa a una distancia máxima 300 kilómetros (160 millas náuticas). Es importante estudiar los organismos ciclónicos tropicales que afectan directa o indirectamente a esta zona geográfica de Cuba donde hay un creciente desarrollo de actividades socioeconómicas de interés para el país, tales como transporte marítimo, actividades pesqueras y turismo, con grandes perspectivas para el desarrollo de actividades marinas recreativo - deportivas, las prospecciones de minerales en el área y la defensa del país. El pronóstico temprano de los campos de olas constituye un elemento indispensable para la planificación de las actividades marítimas y la protección de la vida humana, los recursos técnicos e instalaciones costeras.

En la actualidad, todavía no se puede contar una red de observación suficientemente densa para mediciones del estado del mar al paso de los ciclones tropicales, lo que hace más difícil la labor de pronosticar las variables asociadas a estos organismos. Estas dificultades pueden ser superadas mediante el cálculo del campo de olas a partir de un sistema de ecuaciones obtenidas de los análisis de regresión múltiple de una base de datos en orden cronológico. La herramienta elaborada sería una ayuda más para pronosticar los posibles impactos en la costa baracoense y sus poblados adyacentes.

La ciudad de Baracoa está situada al norte de la provincia de Guantánamo, extremo oriental de Cuba, donde las aguas de mar profundo del Océano Atlántico Norte están muy cercanas a esas costas. Estas áreas presentan una estructura irregular con alternancia de costa acantilada y de terrazas bajas acumulativas y barras compuestas por materiales dendríticos; en general, estas costas se han originado debido a la acción abrasiva marina y por procesos químicos.

Al norte se encuentran los cayos e islas del Archipiélago de las Bahamas Orientales, el Gran Banco del mismo nombre, el Paso de Mayaguana, que se ubica entre las islas Acklins y Mayaguana. Este Paso tiene un ancho de casi 54 kilómetros, y a su vez dista unos 160 kilómetros aproximadamente de la costa norte oriental de Cuba. Entre estas dos islas el Gran Banco de las Bahamas se interrumpe creando un cañón submarino por donde pasa la energía de las aguas profundas del océano, llegando a la costa de Baracoa, que está situada dentro de

la bahía de Miel que es del tipo bolsa. La ciudad posee un malecón contra el cual chocan las olas que producen inundaciones por efecto acumulativo y un drenaje deficiente.

#### **MATERIALES Y METODOS.**

Se archivadas en el Instituto de Meteorología para la verificación y búsqueda de datos, lo que permitió hacer una base de datos de ciclones tropicales que pasaron por las cercanías de Baracoa. Se usaron diferentes cronologías como las de Neumann y Cry (1978) y la del Dr. Mario Rodríguez Ramírez (1968), así como apuntes periodísticos recogidos en los anuarios del Observatorio del Colegio de Belén y notas de trabajos de otros autores que fueron obtenidas.

La base de datos fue ordenada y procesada mediante programas de computadora y se aplicaron dos programas para el cálculo del oleaje asociado a ciclones tropicales que pasaron cerca o sobre Baracoa. Con el programa WAVE3.BAS, basado en las fórmulas de Bretschneider (1952; 1957), se hallaron las variables "altura de la ola significativa" y "tiempo de recalada de la mar de leva", mientras que el programa CLEMAR1, preparado por Juantorena y Beauballet (1996) a partir de las fórmulas del espectro JONSWAP, fue aplicado para calcular las variables "altura de la mar de leva" y "tiempo de afectación de la mar de leva en Baracoa".

El método escogido fue procesar estadísticamente las variables independientes y a partir de las mismas, se calcularon las otras variables dependientes, comprobándose la efectividad de las ecuaciones halladas con una muestra independiente en la que se compararon los valores observados y los calculados.

#### **RESULTADOS**

La muestra tiene una extensión de 122 años, desde 1875 hasta 1996, donde se presentaron 104 casos de ciclones tropicales, los que se dividieron en::

Depresión Tropical .....16 casos.

Tormenta Tropical .....47 casos.

Huracanes .....41 casos.

En el período de tiempo que abarca la muestra analizada se han generado 1162 organismos ciclónicos tropicales en la cuenca Mar Caribe - Océano Atlántico, de los cuales 104 han afectado la ciudad de Baracoa y su vecindad marítima, por lo que la probabilidad de que pase o se genere un ciclón tropical con posibilidades de afectación es de 0.089.

Las condiciones necesarias para que los ciclones tropicales estudiados produzcan marejadas e invasiones marinas en Baracoa, de acuerdo a las observaciones, son las siguientes:

- 1- Radio de los vientos máximos afectando la ciudad de Baracoa.
- 2- Paso de los ciclones tropicales a menos de 300 kilómetros (160 millas náuticas) al norte de Baracoa.
- 3- Las marejadas producidas por los ciclones tropicales que afectan a Baracoa en su propagación.
- 4- Los ciclones tropicales provenientes del mar Caribe que salen a este de Baracoa hacia el primer cuadrante, luego de la recurva.

De la muestra de 104 ciclones tropicales se seleccionaron los siguientes datos, los cuales se tomaron como variables independientes para el análisis estadístico:

- 1- Distancia del ciclón tropical hasta Baracoa (DCTBAR).
- 2- Sector por donde viene o entrada al área de estudio (SECTOR).
- 3- Latitud y longitud (LAT, LONG).
- 4- Velocidad de los vientos sostenidos (FF).
- 5- Persistencia del huracán (PERS).
- 6- Dirección de la trayectoria (DTCT).
- 7- Velocidad de traslación (VTCT).

A partir del análisis y estudio con pruebas empíricas, se determinó que 39 casos de ciclones tropicales tenían las características necesarias y suficientes para que dieran invasiones marinas con las consecuentes inundaciones costeras o casos de fuertes marejadas. Se extrajo una muestra dependiente de 33 casos y otra independiente de 6 casos, para probar la validez de las ecuaciones de pronóstico.

Los parámetros a pronosticar son los siguientes:

- 1- Altura de la ola significativa (OLSIG).
- 2- Altura de la mar de leva (ALTLEVA).
- 3- Tiempo de recalada de la mar de leva a Baracoa (TRECLEV).
- 4- Tiempo de afectación de la mar de leva (TAFECT).

Como es conocido (Yule y Kendall, 1958), un conjunto de puntos específicos por  $n$  variables en un espacio  $n$ -dimensional puede estar representado, al menos aproximadamente, en un espacio de menor dimensión. Podemos entonces encontrar nuevas variables, expresadas como funciones lineales de las antiguas, que representen los datos de igual forma, pero que requiere menos variables independientes.

Esta aproximación es un aspecto del análisis factorial que permite aislar, a partir de un conjunto de variables, un número de factores que serán tomados en cuenta para la mayor parte de las variables.

Partiendo de esta consideración, se aplicó el análisis factorial a la muestra, hallándose dos nuevas variables (FACTOR 1 y FACTOR 2), las cuales fueron incluidas en el análisis de regresión lineal múltiple como variables independientes, considerando la regresión lineal múltiple como una extensión de la regresión lineal simple, que considera dos o más variables independientes en la forma:

$$Y_c = a + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_n x_n.$$

Al realizar la regresión lineal paso a paso (Yamane, 1967), solamente FACTOR 2 resultó significativa, por lo cual se determinó la ecuación para FACTOR 2 (F2) en función de las variables independientes, obteniéndose la misma con un coeficiente de correlación múltiple ( $r$ ) de 0,93 y de determinación ( $r^2$ ) de 0,8649, siendo la misma:

$$F2 = -10.7392 - 0.0182FF + 0.0376VTCT - 0.0027DTCT + 0.2572LAT + 0.0021SECTOR - 0.0291PERS + 0.0947LONG.$$

La variable “altura de la ola significativa” es considerada como muy importante, pues a partir de la misma, e incluyendo el resto de las variables independientes, se calcularán las otras variables dependientes.:

$$\text{OLSIG} = -12.936 - 0.5678\text{F2} - 0.5074\text{LAT} + 0.3601\text{LONG} + 0.0193\text{FF} - 0.0017\text{SECTOR} + 0.0012\text{DTCT}.$$

con un coeficiente múltiple  $r = 0.829$

$$(r^2 = 0.688)$$

Error estimado = 0.775.

Una vez obtenida la ecuación para hallar la ola significativa se procede al cálculo de la ecuación de regresión múltiple para la variable “altura de la mar de leva” que llega al litoral de Baracoa. Del procesamiento de estas variables obtenemos la siguiente expresión:

con un coeficiente múltiple  $r = 0.965$

$$(r^2 = 0.931)$$

Residual mínimo = -0.326

máximo = 0.693

Error estimado = 0.252

medio = 0.000

De igual forma, se efectuó la regresión para la variable “tiempo de afectación de la mar de leva”, los resultados se observan en la siguiente ecuación:

La variable “tiempo de recalada de la mar de leva” arrojó la siguiente ecuación:

$$\text{TRECLEV} = 5.861685 + 0.057321\text{DCTBAR} + 0.21311\text{F2} - 0.291379\text{LAT} - 0.033176\text{PERS}.$$

con un coeficiente múltiple  $r = -0.9797$

$$(r^2 = 0.959)$$

Residual mínimo = -0.295

máximo = 0.722

Error estimado = 0.536

medio = 0.000

$$\text{TAFECT} = 73.70431 + 1.01499\text{TRECLEV} - 0.96733\text{LONG} + 2.50826\text{OLSIG} - 0.11246\text{DCTBAR} - 2.7988\text{ALTLEVA} - 0.0224\text{FF} + 0.70697\text{LAT}$$

con un coeficiente múltiple  $r = 0.717$

$$(r^2 = 0.514)$$

Residual mínimo = -4.16

máximo = 1.47

Error estimado = 1.529

medio = 0.000

### ANÁLISIS DE LA MUESTRA INDEPENDIENTE

La muestra independiente está constituida por 6 organismos ciclónicos tropicales de diferentes categorías, tomados aleatoriamente de la muestra general de 39 casos. Fueron tomadas las variables “altura de la ola significativa”, “altura de la mar de leva”, “tiempo de recalada de la mar de leva a Baracoa” y “tiempo de afectación de la mar de leva”, para las cuales se probó la efectividad de las ecuaciones halladas, así como aquellas variables independientes que entraron en las diferentes ecuaciones..

Para comprobar la efectividad de las ecuaciones se tomaron los valores reales (observados) y los calculados. Para que se considere buenos el ajuste, el diagrama de dispersión debe tener la mayoría de los puntos dentro del límite de confianza de 95%.

La figura 1 muestra el gráfico que compara los valores observados con los calculados para la variable “altura de la ola significativa”, en donde se constata un elevado coeficiente de correlación de 0.83211, lo que se traduce en un margen de error muy pequeño en los valores calculados, así como una distribución de los puntos dentro o muy cercanos al límite de confianza del 95%.

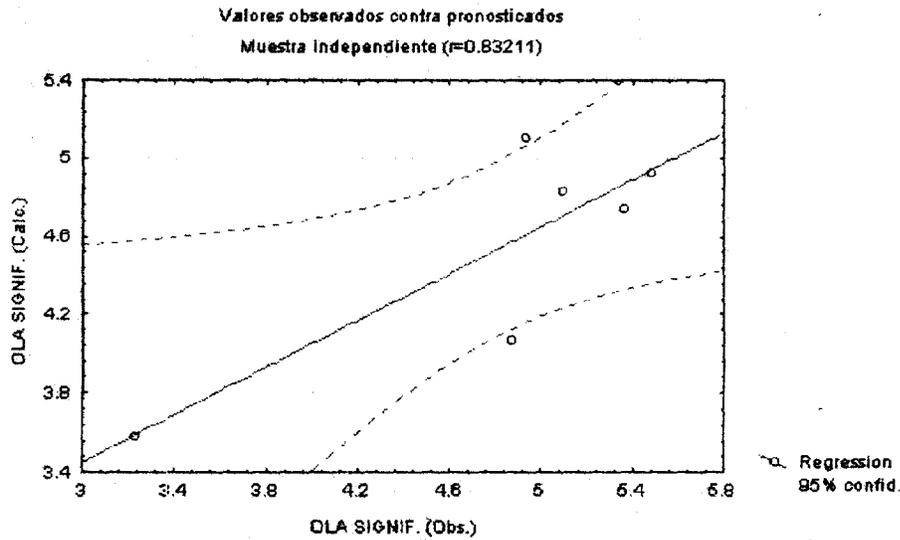


Figura 1. Valores observados contra valores calculados de la variable “altura significativa de la ola” en la muestra independiente.

Las figuras 2 y 3 muestran elevados coeficientes de correlación entre los valores observados y calculados de las variables “altura de la mar de leva” y “tiempo de recalada de la mar de leva a Baracoa”, con valores respectivos de 0.87463 y 0.99497, con todos los puntos dentro del límite de confianza del 95%..

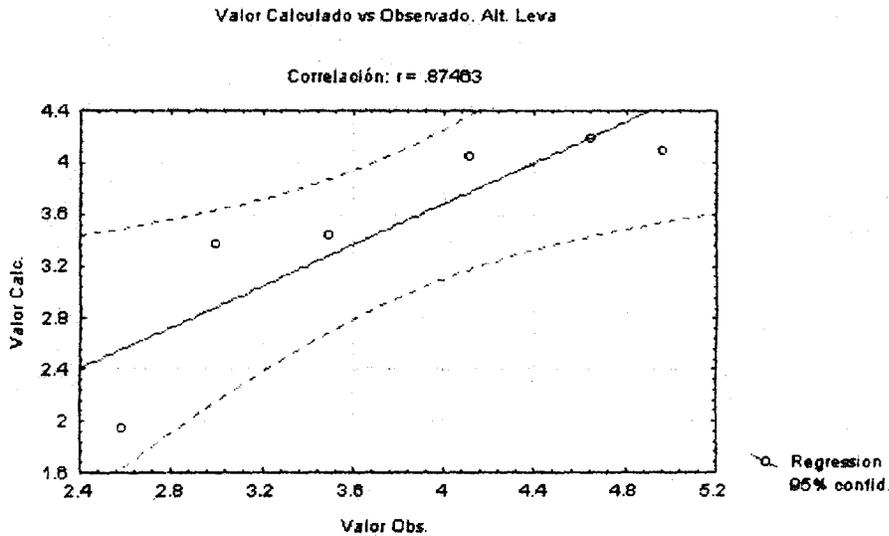


Figura 2. Valores observados contra valores calculados de la variable “altura de la mar de leva” en la muestra independiente.

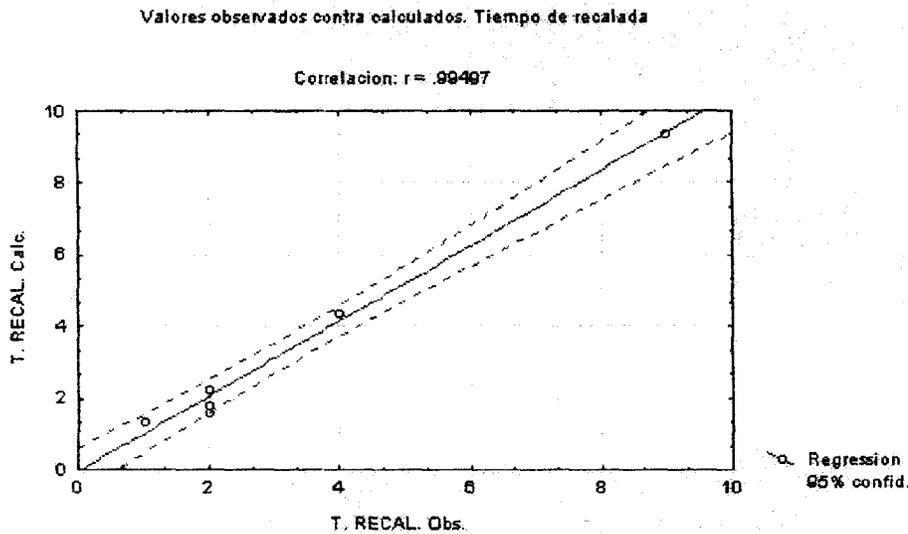


Figura 3. Valores observados contra valores calculados de la variable "tiempo de recalada de la mar de leva a Baracoa" en la muestra independiente.

Como se puede observar, en todos los casos se obtienen coeficientes de correlación múltiple ( $r$ ) superior a 0,82, que se pueden considerar como muy buenos en este tipo de trabajo.

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Dados los elevados coeficientes de correlación de los valores observados con respecto a los calculados de las variables "altura de la ola significativa", "altura de la mar de leva" y "tiempo de recalada de la mar de leva en Baracoa" en la muestra independiente, así como la distribución de los puntos dentro del límite de confianza del 95%, se puede afirmar que las ecuaciones halladas para el cálculo de las mencionadas variables son adecuadas para su uso en el pronóstico de afectaciones por marejadas generadas por organismos ciclónicos tropicales a la ciudad de Baracoa.

No se pudo obtener un resultado similar al anterior para la variable "tiempo de afectación de la mar de leva que llega a Baracoa", pues los valores observados tienen carácter discreto, o sea, siempre serían 6 o 12 horas, según resultados de la aplicación de las formulaciones de Bretschneider para el cálculo del tiempo de afectación de la mar de leva proveniente de los ciclones tropicales.

La estimación por anticipado de la trayectoria de un ciclón tropical es funcional con estas ecuaciones, las cuales se recomiendan tanto para la planificación de movimientos y actividades de diferente índole, así como para la emisión de Avisos Tempranos, que son muy útiles y necesarios para la Defensa Civil en su trabajo de protección de las vidas humanas y los recursos materiales.

Se considera debe incluirse el método en la temporada ciclónica de 1998 para su comprobación, validación y ajuste, a fin de su incorporación al trabajo operativo en 1999.

**BIBLIOGRAFIA**

1. Anónimo. Anuario del Observatorio del Colegio de Belén (1865 - 1925). La Habana.
2. Anónimo. Álbum de artículos periodísticos de la década 1880 - 1890. Observatorio del Colegio de Belén. La Habana.
3. Bretschneider, C. L. (1952). The generation and decay of wind waves in deep water. Transactions of American Geophysical Union, Vol. 33, pp. 381 - 389.
4. Bretschneider, C. L. (1957). Hurricane design - wave practice, Journal of the Waterways and Harbour Division, ASCE, Vol. 83, WW2, N0 1238.
5. Juantorena, Y., P. Beauballet (1996). Método de cálculo de la mar de leva mediante técnicas espectrales. Boletín Virtual de SOMETCUBA, Vol. 2, No. 2, INSMET, La Habana.
6. Neumann, C., G. Cry (1978). Tropical cyclones of the North Atlantic Ocean, 1871 - 1980, Ashville, N. C. 1978, revised 1981.
7. Rodríguez, M. (1968). Cronología clasificada de los huracanes que han azotado a Cuba desde 1800 hasta 1968 (169 años). Instituto de Meteorología, La Habana.
8. Yamane T. (1967): Statistics; An Introductory Analysis. Ed. Revolucionarias. La Habana. Cuba. pp. 752-766.
9. Yule, G.V, M.G. Kendall.(1958): An Introduction to the Theory of Statistics. Charles Griffin & Co. Ltd., London, England.

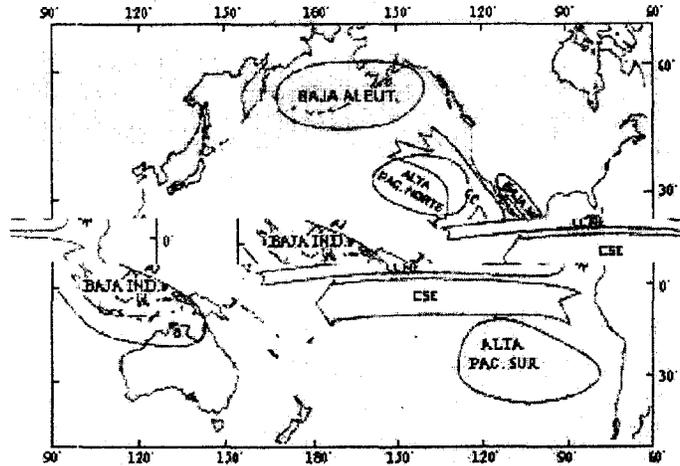
## COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DEL MAR EN EL PACÍFICO MEXICANO Y SU RELACIÓN CON EL DESARROLLO DE LOS CICLONES TROPICALES EN 1997

*Alejandro Martínez Z. , Sergey N. Bulgakov ,  
Valentina Davydova B., Angel Meulenert P.*

*Instituto de Astronomía y Meteorología, Departamento de Física,  
CUCEI, Universidad de Guadalajara.  
Av. Vallarta # 2602, C.P. 44130, Guadalajara, Jalisco, México.  
amartine@udgserv.cencar.udg.mx*

### Introducción

De acuerdo con las hipótesis existentes [2,3,4,6,7,8,9,10] los sistemas de circulación oceánica responsables de la distribución de calor y masa (por ende y de energía), en la zona de surgimiento de los Ciclones Tropicales (CT) del Pacífico Oriental (PO), experimentan importantes cambios estacionales e interanuales. La Contracorriente Norecuatorial (CCNE), la Corriente Costera de Costa Rica (CCCR), la Corriente de California (CC), además de las Corrientes Nor y Surecuatorial (CNE, CSE) y las contracorrientes subsuperficiales, son sistemas de corrientes macroescalares que obedecen a los patrones promedio de circulación atmosférica de gran escala del PO (Fig. 1).



**Fig.1** Ubicación de los centros atmosféricos y corrientes superficiales que determinan la distribución de calor en el Pacífico Oriental Tropical (Baumgartner y Christensen, 1985). tomado de [2]

Los sistemas atmosféricos Semipermanentes como las Altas Subtropicales, las Bajas Aleutiana y de Indonesia, la Baja del suroeste Estadounidense y noroeste Mexicano, generan tanto los vientos dominantes como las corrientes oceánicas promedio de la zona en cuestión.

A menor escala, los movimientos marinos originados en la cercanía de las costas de México y Centro América tienen un complejo carácter tridimensional, por la influencia del relieve del

fondo y de la costa, así como de las condiciones atmosféricas de cortos periodos (del orden de algunos días) como el paso de frentes invernales y de las tormentas de verano. Destacan entre estos movimientos marinos los giros, meandros, chorros, filamentos, frentes de surgencias, que tienen escala espacial del orden de decenas de kilómetros [7].

Un interesante papel es el de las surgencias costeras o corrientes ascendentes, las cuales mantienen una estructura térmica vertical de la capa superficial, donde se encuentra contenida la termoclina (primeros 100m), que en suficiente medida determina el estado termodinámico de la parte oriental del océano, en el periodo previo a la temporada ciclónica. Esto debido a que su máxima frecuencia e intensidad ocurre precisamente en primavera, cuando se presentan las condiciones meteorológicas más favorables. En este trabajo se muestran resultados de mediciones reales y de modelación numérica en torno al estudio de este fenómeno en el *PO*.

### **Materiales y método**

El análisis de datos de mediciones obtenidos en Campañas Oceanográficas realizadas en aguas del Pacífico Tropical Mexicano, de 1982-1987 (*B/O EL PUMA*) y de 1990-1996 (*B/O ALTAIR*) mostró importantes diferencias entre los perfiles verticales de temperatura marina en años "El Niño" y en "no-El Niño" [1]. Estas diferencias se hacen evidentes en imágenes satelitales promedio mensuales de la misión Nimbus/CZCS, de contenido de clorofila y Temperatura Superficial Oceánica (*TSO*) detectadas .

Con el fin de investigar la circulación generada por los vientos, y particularmente los factores que participan en los procesos de desarrollo y transformación de zonas de surgencia, se adaptó un modelo numérico multicapas [5] basado en el sistema completo de ecuaciones no lineales de hidrodinámica, con resolución horizontal de 9x9 km., batimetría y costa reales, en la región entre 107-102°W y 18-24°N.

En el momento inicial, la temperatura y salinidad se toman homogéneos en horizontal y estratificados en vertical, de acuerdo a los perfiles observados durante primavera, bajo condiciones "No-El Niño" cuando las surgencias debieran ser bastante notorias en la zona, y los observados bajo condiciones "El Niño".

Durante el otoño y el invierno, el Mínimo Aleutiano es más intenso y amplio, provocando vientos mensuales en promedio mas débiles, dominando los vientos dictados por el paso de tormentas invernales. No es sino hasta marzo que el Mínimo Aleutiano se debilita y migra hacia el norte, permitiendo que el anticiclón se amplíe e intensifique, ocupando también posiciones en latitudes mas altas, lo cual produce que, al aparecer persistentemente bajas presiones en el suroeste de E.E.U.U. y en el noroeste mexicano, los vientos sean más estables del noroeste soplando paralelamente a las costas (los mas favorable para las surgencias costeras en el Pacífico Mexicano).

Durante eventos de "ENOS" como el de 1997-1998 se modifica la estratificación de la termoclina en el borde occidental del continente Americano, gracias al avance de aguas cálidas del Pacífico Central y oeste a través de distintos mecanismos [11], como ondas Kelvin, brazos de corriente cálidos desprendidos de la *CCNE*, la intensificación de la *CCCR*. Esto surge como resultado del debilitamiento de los alisios, lo que a su vez tiene un efecto inhibitorio en el mecanismo de formación de surgencias.

Desde las primeras manifestaciones de ENOS 97 (marzo-abril), las *TSO* mostraron anomalías positivas en zonas del Pacífico Mexicano, indicando que a pesar de haber iniciado la temporada de surgencias, ocurrieron variaciones en la dirección y/o velocidad del viento, o bien en la estructura de la termoclina.

### Resultados y conclusiones

Se experimentó con vientos de 8 direcciones, mostrando que los noroestes son los más favorables para el desarrollo de surgencias. Este hecho es teóricamente bien conocido, sin embargo aun no se ha estudiado lo suficiente en el Pacífico Tropical. Además de los noroestes, solo los vientos de dirección sureste producen afloramiento de aguas profundas más frías, aunque los gradientes de temperatura no son tan elevados. Se determinaron las zonas de mayor desarrollo de surgencias y las características cuantitativas respecto a su intensidad y los gradientes de temperatura y salinidad en distintos niveles, así como la estructura e intensidad de la circulación horizontal y vertical.

Los gradientes de temperatura con la aparición de surgencias costeras bajo la influencia de los noroestes alcanzan en algunas zonas entre 5-7°C. Cuando se experimento con estratificación típica de años Niño, los gradientes térmicos (debidos a manchas frías por afloramiento) son débiles, ya que las surgencias simplemente no pueden desarrollarse lo suficiente. Es de esperarse una desestabilización de la CC, como lo sugieren en [7], modificando la estructura de los flujos de una buena parte del Pacífico Mexicano.

Los resultados preliminares de la modelación y su comparación con imágenes satelitales, sugieren que los movimientos tridimensionales forzados por el viento en la parte oceánica adedaña con las costas, es uno de los principales mecanismos en la formación de anomalías de Temperatura del mar en el Pacífico Mexicano. La inhibición de procesos como el de surgencia costera, promovió conjuntamente con el arribo de aguas del Pacífico Central, una excesiva acumulación de aguas cálidas en el Pacífico Mexicano durante la primavera y verano de 1997. Esta situación como es conocido, originó tormentas tropicales que alcanzaron cifras récord de intensidad.

### Bibliografía

1. Amezcua F.L., 1996. *Peces demersales del Pacífico Central de México*. México, D.F, UNAM-ICMYL-CONABIO.
2. Badan A., 1997. La corriente Costera de Costa Rica en el Pacífico Mexicano, en : M.F. Lavín, editor, *Contribuciones a la oceanografía Física en México*, Monografía No.3, Unión Geofísica Mexicana, pp.99-112.
3. Baumgartner T.R. and N. Christensen, Jr., 1985. Coupling of the Gulf of California to large scale interannual climate variability. *J. of Marine Resarch*, No.43, pp.825-848.

4. Kort V.G., 1968. *The Pacific Ocean*. The Academy of Sciences of the USSR. Moscu, Editorial Nauka.
5. Kosnyrev V.K., Mikhailova E.N., Shapiro N.B., 1996. Numerical Modeling of Upwelling in the Northeastern Black Sea. *Meteorology and Hidrology*, No.12
6. Martínez A.Z., Meulenert P.A., Bulgakov N.S., 1996. Estudio de la Interacción Océano-Atmósfera para el análisis de la Temporada Ciclónica de 1996. *Boletín Informativo Mensual*. Instituto de Astronomía y Meteorología, Universidad de Guadalajara. No. 376.
7. Parés S.A., López, M. y Pavía, E.G., 1997. Oceanografía Física del Océano Pacífico Nororiental en : M.F. Lavín, editor, *Contribuciones a la oceanografía Física en México*, Monografía No.3, Unión Geofísica Mexicana, pp.1-24.
8. Roden G.I., 1958. Oceanographic and Meteorological Aspects of the Gulf of California. *Pacific Sciences*, V.12, No.1, pp. 21-45.
9. Wirtki K., 1965. Surface Currents of the Eastern Tropical Pacific Ocean. *Inter-American Tropical Tuna Commission, Bulletin IX*, No. 5, pp.63-97
10. Wirtki K., 1967. Circulation and Water Masses in the Eastern Equatorial Pacific Ocean. *Int. J. Oceanol. & Limnol.* Vol.1, No.2, pp.117-147.
11. Wirtki K., 1985. Water Displacements in the Pacific and the Genesis of El Nino Cycles. *J. Of Geoph. Res.* Vol. 90 No.C4, pp.7129-7132.