

**CAPÍTULO 5. VARIABILIDAD MENSUAL Y ANUAL DE LA COMPONENTE  
APERIÓDICA DEL NIVEL DEL MAR DE ORIGEN METEOROLÓGICO**

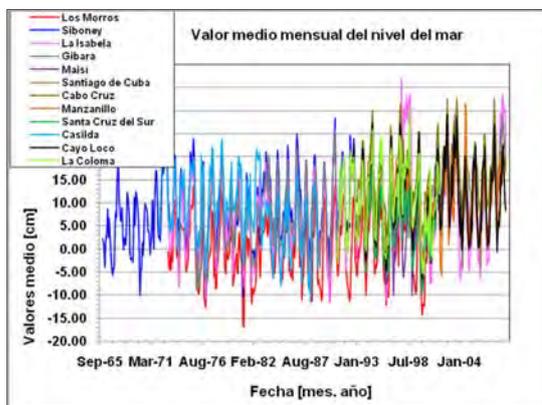
## **CAPÍTULO 5. VARIABILIDAD MENSUAL Y ANUAL DE LA COMPONENTE APERIÓDICA DEL NIVEL DEL MAR DE ORIGEN METEOROLÓGICO**

El objetivo del presente capítulo es caracterizar la variabilidad mensual y anual de las variaciones aperiódicas del nivel del mar de origen meteorológico, y determinar a cuáles eventos sinópticos responden y en qué condiciones de la variabilidad del clima se producen.

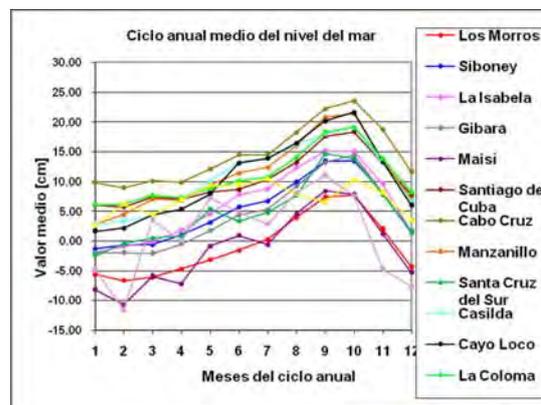
### **5.1. Anomalías mensuales del nivel del mar.**

Los valores medios mensuales (VMM) exhibieron, en general, tendencia al aumento durante el período analizado (Figura 5.1.1, a; Anexo 6); lo cual se debe a la tendencia al aumento del nivel medio del mar (NMM) identificable en los VMM (Walton Jr., 2007). El ciclo anual medio del nivel del mar de las diferentes localidades estudiadas exhibió el máximo estacional entre septiembre y octubre, y el mínimo entre enero y marzo (Figura 5.1.1, b). Los resultados correspondientes a Los Morros, Siboney, Casilda y Gibara concordaron con otros obtenidos con una muestra menor de datos y otro procedimiento de obtención de los VMM (ACC, 1989; Rodas y Hernández, 1994).

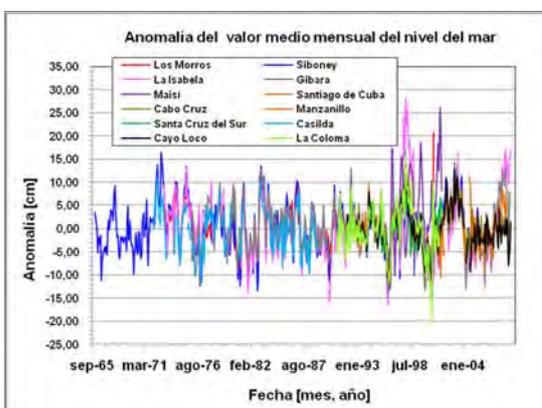
La intensidad mensual (VM) manifestó un aumento desde inicios de los 80, con sus valores más elevados en La Coloma, La Isabela y Siboney (Figura 5.1.1, d; Anexo 7). El ciclo anual de la intensidad mostró sus valores máximos en el primer y cuarto trimestre en localidades interiores de la plataforma insular y en Siboney (Figura 5.1.1, e).



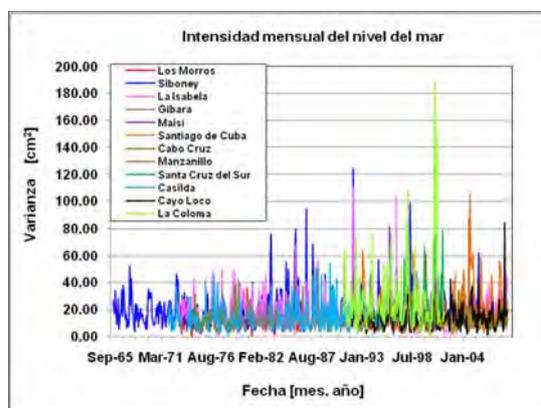
a



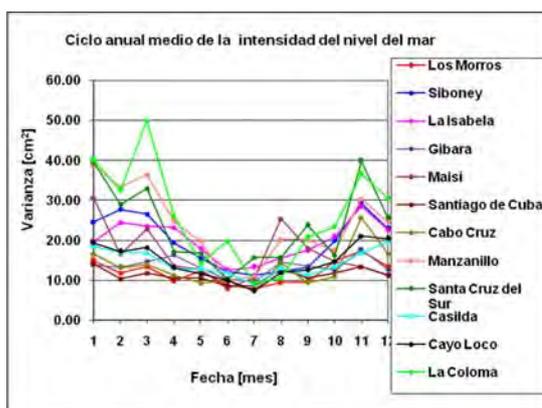
b



c



d



e

Figura 5.1.1. Valores medios mensuales del nivel del mar (a), ciclo anual medio del nivel del mar (b), anomalías del valor medio mensual del nivel del mar (c), intensidad mensual del nivel del mar (d), ciclo anual de la intensidad mensual (e).

Los resultados anteriores concuerdan con los mostrados en el Capítulo 3 (Epígrafe 3.1), obtenidos con otros procedimientos de filtrado (Capítulo 2; Anexo 2). Esto confirma que los valores medios diarios constituyen una buena representación de las variaciones

aperiódicas del nivel del mar de origen meteorológico (Guerman y Levikov, 1988), para el análisis del comportamiento mensual y, en específico, estacional de las mismas.

Los VMM y el CAM (Figuras 5.1.1, a y b) se encuentran dominados por la señal periódica que impone la estacionalidad de la estructura térmica de las capas superiores del océano, del forzamiento del viento y de las corrientes geostroficas (Chelton y Enfield, 1986). La VM y el CAV (Figuras 5.1.1, d y e) responden a los cambios estacionales de la frecuencia de ocurrencia de los eventos sinópticos, que suelen ser más numerosos en los primeros y últimos meses del ciclo anual. Debido a lo anteriormente expuesto, la variabilidad mensual del nivel del mar se define como un proceso aleatorio periódicamente correlacionable, con periodicidad anual y una fuerte componente semianual en algunas regiones (Guerman y Levikov, 1988).

Con la sustracción del ciclo anual medio (Figuras 5.1.1, b) a las series de VMM (Figura 5.1.1, a), se obtuvieron las series de las anomalías de los valores medios mensuales (AVMM). Éstas experimentaron una fluctuación máxima de 44,74 cm en La Isabela durante el período analizado, alcanzando sus máximos valores absolutos en Siboney, La Isabela, y Maisí (Figura 5.1.1, c; Anexo 8), y mostrando un comportamiento bastante estable hasta los años 1997 – 2001, cuando aparecieron valores muy elevados en La Isabela, Maisí y Los Morros.

## 5.2. Anomalías mensuales y anuales del nivel del mar durante el ENOS.

El ENOS (El Niño-Oscilación del Sur) constituye un evento recurrente aperiódico que se manifiesta a intervalos de dos a cinco años, y como promedio cada cuatro años (Voitiriez y Guy, 1999). Está formado por dos eventos, uno de los cuales – El Niño – consiste en un calentamiento inusual de las usualmente frías aguas oceánicas superficiales al oeste de América del Sur; y el otro – la llamada Oscilación del Sur – que ocurre como una variación interanual coherente de la presión barométrica (Enfield, 1992), dicho en dos definiciones muy sintetizadas. La fase opuesta de este evento se denomina La Niña. El ENOS genera un forzamiento atmosférico de baja frecuencia sobre las variaciones del nivel del mar en el Océano Pacífico (Chelton y Enfield, 1986), del cual resulta la ocurrencia de anomalías de los VMM. Desde 1966 hasta la fecha, el ENOS ha ocurrido 12 veces (Tabla 5.2.1), clasificando como fuertes los de 1971- 1972, 1982-1983 y 1997-1998 (Voitiriez y Guy, 1999).

Tabla 5.2.1. Eventos El Niño – Oscilación del Sur (ENOS) durante el período analizado (Tomado de Earth System Research Laboratory, 2007).

n/n	Desde	Hasta	Duración (meses)
1	Mayo 1965	Junio 1966	14
2	Abril 1972	Marzo 1973	12
3	Agosto 1976	Marzo 1977	13

4	Julio 1977	Enero 1978	7
5	Abril 1982	Julio 1983	16
6	Agosto 1986	Febrero 1988	19
7	Marzo 1991	Julio 1992	17
8	Febrero 1993	Setiembre 1993	8
9	Junio 1994	Marzo 1995	10
10	Abril 1997	Abril 1998	13
11	Mayo 2002	Marzo 2003	11
12	Junio 2004	Mayo 2005	12

La evolución del ENOS se monitorea mediante índices como el Índice de la Oscilación del Sur (IOS), que representa uno de los indicadores de la ocurrencia del ENOS y de su fase opuesta (Figura 5.2.1). El IOS se obtiene como la diferencia de los valores superficiales de presión atmosférica entre la isla de Tahití y Darwin (Australia), y representa una medida comparativa de cómo cambia la presión atmosférica en dos grandes regiones, occidental y central-oriental, del Océano Pacífico Tropical (Cárdenas, 1998).

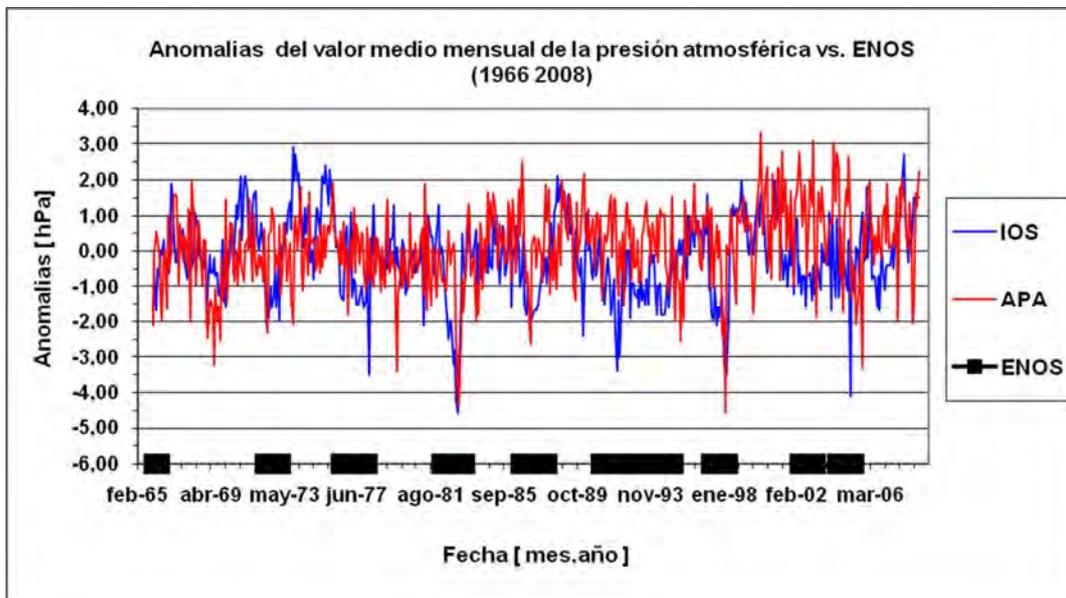


Figura 5.2.1. Índice Oscilación del Sur (IOS) durante el período analizado.

Se identificaron alteraciones del patrón estacional del nivel del mar, consistentes en desviaciones de la posición y amplitud de los máximos y mínimos estacionales de los VMM y de las AVMM, y en el aumento de la VM en presencia del ENOS. Durante los años ENOS ocurrió frecuentemente el aumento de los VMM entre enero y junio. En algunas ocasiones el máximo estacional se trasladó a mayo o junio, resultando el VMM en estos meses igual o mayor que en septiembre u octubre, como ocurrió en La Isabela en 1998 y en Siboney en 1992 (Figuras 5.2.2, a y b).

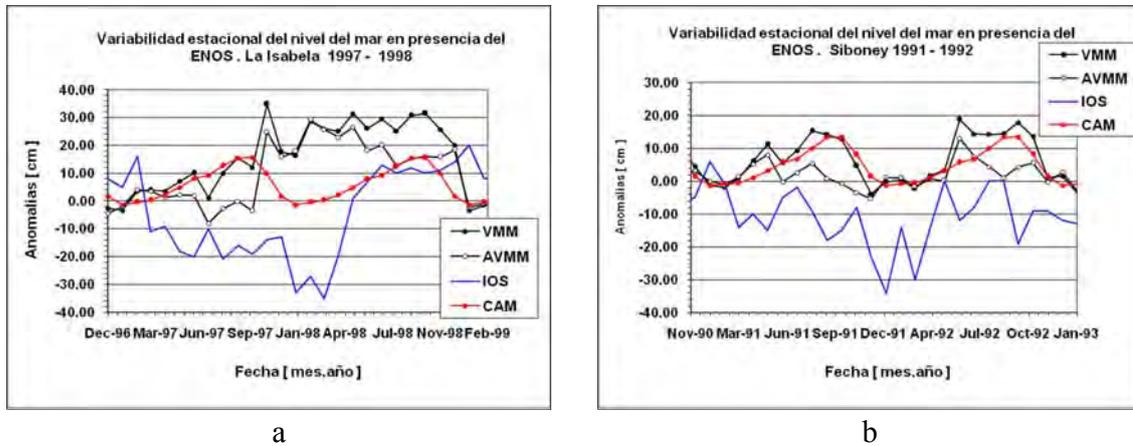


Figura 5.2.2. Variaciones del nivel del mar durante el evento ENOS 1997 – 1998 en La Isabela (a), y en Siboney durante 1991 – 1992 (b).

Blázquez (1989) fue el primero en relacionar las AVMM en aguas cubanas con las anomalías de la presión atmosférica (APA) en presencia del ENOS, específicamente con el intenso evento 1982 – 1983, debido principalmente al conocido efecto de barómetro invertido, reconociendo la posible existencia de otras causas como el viento. Mediante el análisis de un período mayor de información del IOS, las APA y las AVMM, se pudo establecer que no todas las APA mensuales negativas se encontraron relacionadas con el ENOS, como la de agosto de 1995, ni todos los ENOS provocaron APA. Sin embargo, ocurrieron APA mensuales negativas intensas en presencia de ENOS fuertes (Figura 5.2.3). La variabilidad de los campos bórico y de viento se encuentra estrechamente relacionada y se intensifica en presencia de eventos sinópticos. Por esta razón también se analizó la intensidad de las variaciones aperiódicas del nivel del mar, estimada mediante la varianza

mensual de los valores medios diarios (Capítulo 2, Anexo 2), como un indicador de la influencia promedio del viento.

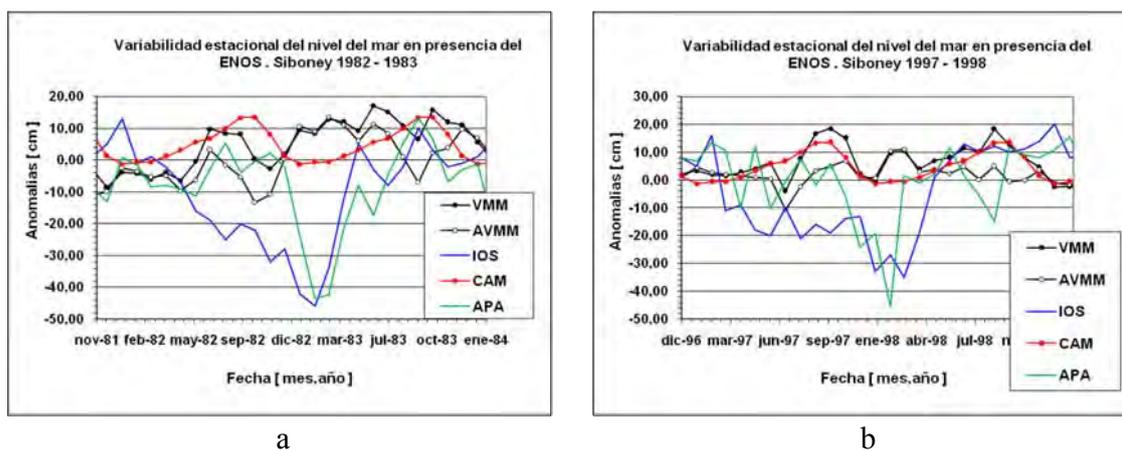
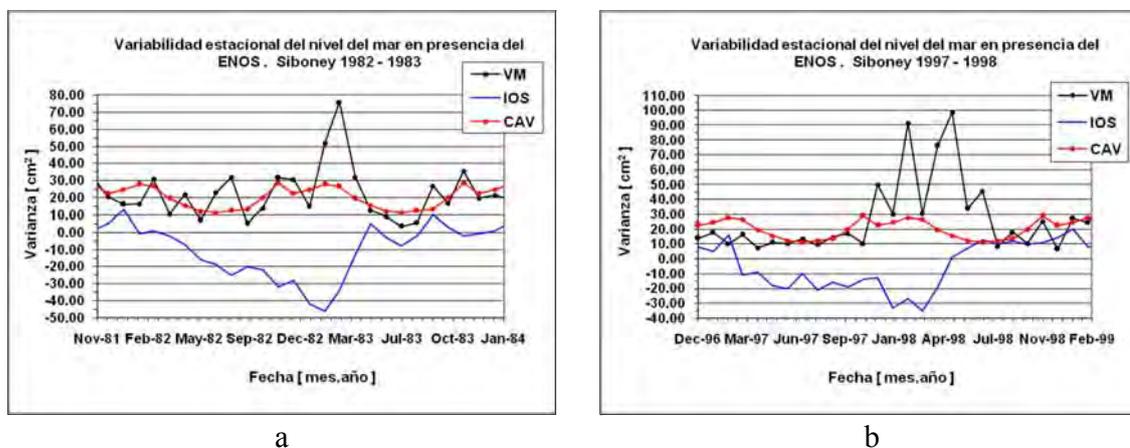
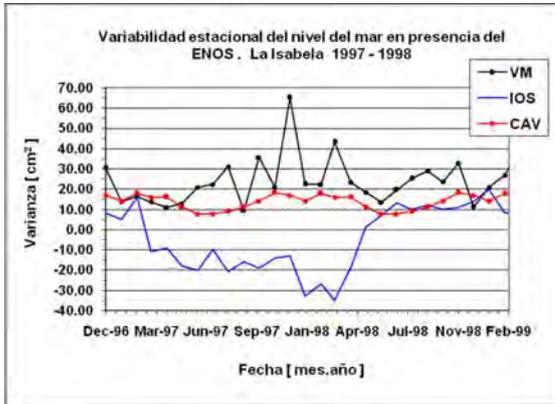


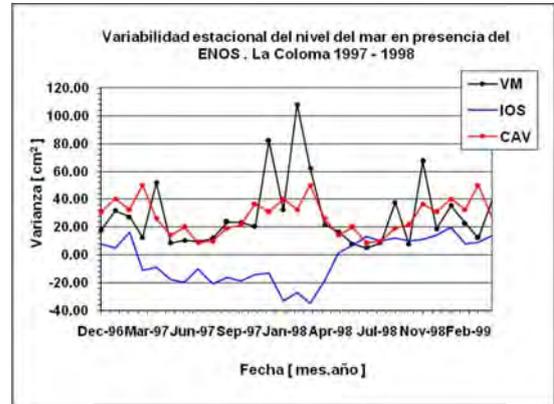
Figura 5.2.3. Variabilidad estacional del nivel del mar en presencia del ENOS 1982 – 1983 (a) y 1997 – 1998 (b).

Los valores más elevados de la intensidad mensual de las variaciones aperiódicas del nivel del mar ocurrieron durante los eventos ENOS fuertes de 1982 – 1983 y el de 1997 - 1998, principalmente en sectores costeros del occidente y centro del país (Figuras 5.2.4, a - d).

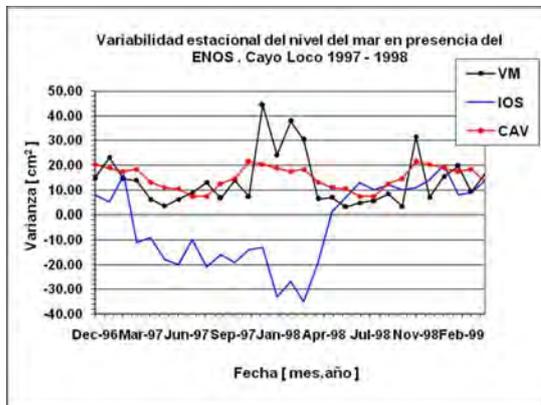




c



d



e

Figura 5.2.4. Intensidad mensual de las variaciones aperiódicas del nivel del mar durante el evento ENOS.

En general, las alteraciones más notables del patrón estacional tuvieron lugar durante los ENOS fuertes 1982-83 y 1997-98.

Lo anteriormente expuesto se debe a que en presencia del evento ENOS se produce una anomalía positiva del número de frentes fríos, y un desplazamiento más al sur (por debajo de los 30° N) de las trayectorias de las bajas extratropicales (González, 1999 y 2000; Rubiera y Caymares, 1998), con manifestaciones más intensas del viento y de las marejadas. Rubiera y Caymares (1998) describen los tres patrones sinópticos más importantes durante los eventos ENOS: frente frío fuerte seguido de intenso anticiclón

continental migratorio y onda polar que no es privativo sólo de los años ENOS, baja extratropical intensa que se desarrolla en el Golfo de México con uno o varios centros de circulación, y bajas "Golfianas" que se desarrollan en el Golfo de Campeche o sobre el Golfo de Honduras. En el caso de las bajas, la primera tiende a formarse en el noroeste del Golfo de México o desarrollarse en el sudeste del estado norteamericano de Texas, con trayectorias hacia el este-nordeste, para después inclinar su rumbo hacia el nordeste; la segunda se mueve al este-nordeste y después al nordeste, cruzando sobre el occidente y centro de Cuba o sobre el extremo sudeste del Golfo de México.

En las condiciones antes descritas, se intensifica la variabilidad de los campos de la presión atmosférica y del viento. Como se mostró en el Capítulo 4, las variaciones aperiódicas del nivel del mar responden a las de la presión y el viento, con elevados valores de coherencia en determinadas zonas del espectro energético, y se propagan a lo largo de las costas norte y sur hasta localidades del centro del país (Figuras 5.2.4, c y e). De esta forma, se establece un mecanismo de tele-conexión entre el ENOS y las variaciones aperiódicas del nivel del mar, término ya usado sólo con relación a los sistemas frontales (González, 1999).

En los espectros de la variabilidad anual sobresalen, entre otros, los componentes que obedecen a cambios en los parámetros de la interacción océano-atmósfera y a los efectos de la reestructuración de los procesos del sistema océano-atmósfera, con períodos de dos a siete años (Guerman y Levikov, 1988). A éstos corresponden, por la periodicidad de su ocurrencia, eventos de la variabilidad del clima como el ENOS.

Como resultado del presente trabajo, se pudo comprobar que las anomalías del valor medio anual (AVMA) alcanzaron sus valores más elevados en 1972, 1975, 1983, 1998 y 2003, y ocurrieron máximos anuales menores en 1978, 1986, 1992 y 1994, con una AVMA extrema en 1998 en La Isabela (Figura 5.2.5, a). La intensidad anual (VA) alcanzó sus valores más altos en La Isabela, La Coloma, Siboney y Manzanillo (Figura 5.2.5, b), localidades del archipiélago donde ocurrieron también las variaciones aperiódicas de la CA-NM más intensas (Capítulo 3). Debe destacarse que los climatólogos reconocen en el ENOS la causa de mayor variabilidad climática interanual en el planeta (Rubiera y Caymares, 1998).

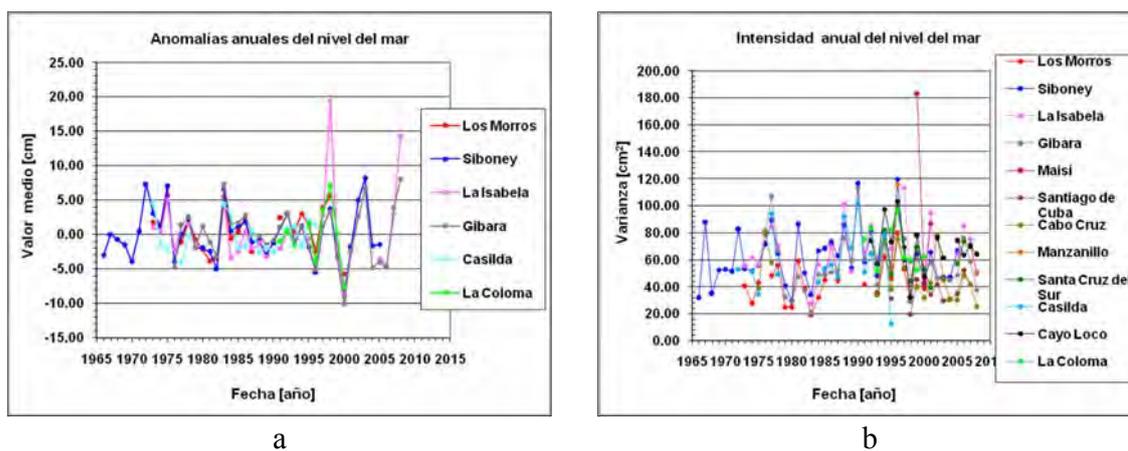


Figura 5.2.5. Anomalías del valor medio anual (a) e intensidad anual (b) del nivel del mar. Las anomalías mensuales y anuales constituyen residuos aperiódicos que se encuentran relacionados con eventos de la variabilidad del clima, como el ENOS (Chelton y Enfield, 1986). En el presente estudio se amplió el conocimiento acerca de la naturaleza de esta relación para las aguas cubanas.

En conclusión, en presencia del ENOS ocurren fuertes anomalías de la variabilidad mensual del nivel del mar, debido al establecimiento de condiciones hidrometeorológicas más favorables para las mismas. Estas anomalías consisten en un aumento anómalo del nivel medio mensual, debido a anomalías negativas de la presión atmosférica principalmente, que no es privativo de los años ENOS, y un aumento de la intensidad mensual de las variaciones aperiódicas del nivel del mar.

**CAPÍTULO 6. CÁLCULO Y PRONÓSTICO DE LAS VARIACIONES  
APERIÓDICAS DEL NIVEL DEL MAR DE ORIGEN METEOROLÓGICO EN LA  
ESCALA SINÓPTICA DE FRECUENCIAS**

## **CAPÍTULO 6. CÁLCULO Y PRONÓSTICO DE LAS VARIACIONES APERIÓDICAS DEL NIVEL DEL MAR DE ORIGEN METEOROLÓGICO EN LA ESCALA SINÓPTICA DE FRECUENCIAS**

El objetivo del presente capítulo consistió en la elaboración de un procedimiento para el pronóstico de las variaciones aperiódicas del nivel del mar, de origen meteorológico en la escala sinóptica de frecuencias, mediante métodos espectrales.

### **6.1. Información utilizada.**

En calidad de información primaria se utilizaron los datos de las alturas horarias del nivel del mar de la estación Siboney, los valores horarios de la presión atmosférica a nivel del mar, y de la velocidad y dirección del viento de la estación Casablanca desde 1980 hasta el 2005; así como los valores horarios de la velocidad y dirección del viento y de la presión atmosférica a nivel del mar, de la estación boya 42003 de la NOAA (<http://www.ndbc.noaa.gov/maps/Florida.shtml>), ubicada en el Golfo de México, disponibles en Internet (Anexo 3).

### **6.2. Método empleado.**

Se utilizó la técnica conocida como "pronóstico perfecto" discutida ampliamente en Julián y Murphy (1972) y aplicada por Guerman y Levikov (1988), y más recientemente por Limia (2002) en Cuba.

Esta técnica consiste en utilizar la información real de los plazos de tiempo futuros como la información pronóstico (resultante de un modelo dinámico). O sea, se utiliza la información histórica tanto de la hora base del pronóstico como la del plazo de tiempo pronóstico, para la obtención de los coeficientes de la ecuación.

La principal ventaja de esta técnica es que al poderse utilizar la salida de cualquier modelo dinámico de pronóstico de campo, toda mejora en dichos modelos dinámicos queda introducida en el modelo dinámico estadístico (Limia, 2002).

### 6.3. Intervalo de tiempo de la muestra dependiente.

Se seleccionó el año 1993 como intervalo de tiempo de la muestra dependiente, a partir del cual se calcularon los coeficientes de regresión espectral, ya que para el mismo se obtuvo la mayor coherencia entre los predictores potenciales y el nivel del mar, y una menor diferencia entre los espectros real y restablecido, de acuerdo con Guerman y Levikov, 1988.

### 6.4. Selección de las variables meteorológicas como predictores potenciales.

Entre las variaciones aperiódicas de la presión atmosférica a nivel del mar y de las componentes meridional y zonal del viento en Casablanca, y las variaciones aperiódicas del nivel del mar de origen meteorológico para la banda de frecuencias de 0,07 a 1,00 cpd en Siboney, se obtuvieron valores significativos y elevados de coherencia, así como una buena correspondencia entre los espectros real y restablecido para casi todos los intervalos

de tiempo analizados sólo para la presión atmosférica (Capítulo 4), con una respuesta lineal más fuerte del nivel del mar. Por esta razón, se desestimó la utilización de las componentes meridional y zonal del viento obtenidas de los registros de Casablanca como predictores potenciales.

Se incorporaron al análisis los datos de presión atmosférica a nivel del mar y viento de la estación boya 42003, ubicada en las aguas adyacentes del Golfo de México (Anexo 3). Esta boya se encuentra ubicada con un ángulo de aproximadamente  $315^\circ$  con respecto a la longitud de ubicación de la estación Siboney, el cual coincide con el ángulo de la componente efectiva (Guerman y Levikov, 1988) de la dirección del viento para Siboney (Capítulo 4). En este sentido, y como resultado del análisis de las funciones de coherencia efectuado en el Capítulo 4, se seleccionó la componente efectiva del viento desde la estación boya 42003 como el predictor más efectivo, después de la presión atmosférica en Casablanca. Se determinó el gradiente de la presión atmosférica entre la estación Casablanca y la estación boya como el tercer predictor en orden de importancia.

Lo anteriormente expuesto se debe a que la estación Siboney se encuentra en un sector costero con condiciones físico geográficas relativamente poco favorables para el desarrollo de efectos no lineales (Murty y El – Sabh, 1981; Murty, 1984), sin sinuosidades e inmediatamente abierto a las aguas oceánicas profundas del Golfo de México y el Estrecho de La Florida. Además, la distancia aproximada de 14,0 km en línea recta, que media entre Siboney y Casablanca (Figura 2.3.1), es despreciable en comparación con la vastedad del área de influencia de los eventos sinópticos. Estos eventos, como se sabe, ejercen en

muchos casos una influencia lejana desde su origen y desarrollo en el continente o las aguas del Golfo de México (Pérez, y col., 2001).

## 6.5. Resultados.

Lo anteriormente expuesto fundamentó y sirvió de premisa para la obtención de la siguiente ecuación de regresión espectral de las variaciones aperiódicas del nivel del mar de origen meteorológico, a partir de la componente efectiva del viento en la estación boya 42003 y la presión atmosférica a nivel del mar en la estación Casablanca, para un modelo de dos entradas de acuerdo a 2.4.12 y 2.4.13:

$$CA - NM(t) = a + b_{zy} CEV(t) + b_{vy} PA(t) \quad (6.5.1)$$

$$a = \overline{CA - NM} - b_{zy} \overline{CEV} - b_{vy} \overline{PA} \quad (6.5.2)$$

Donde:

$CA - NM(t)$ : Valor simulado o pronosticado de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico.

$CEV(t)$ : Valor real (simulación, con muestras dependiente e independiente) o valor pronosticado (pronóstico, a partir de variable meteorológica pronosticada) de la componente efectiva de la dirección del viento en la estación boya 42003.

$PA(t)$ : Valor real (simulación, con muestras dependiente e independiente) o valor pronosticado (pronóstico, a partir de variable meteorológica pronosticada) de la presión atmosférica a nivel del mar en la estación Casablanca.

$\overline{CA-NM}$ : Promedio de los últimos tres valores reales de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico.

$\overline{CEV}$ : Promedio de los últimos tres valores reales de la componente efectiva de la dirección del viento.

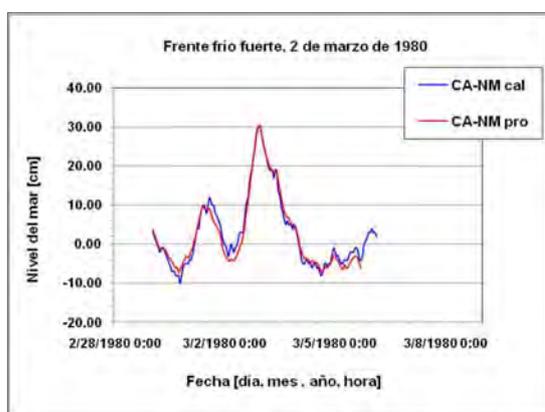
$\overline{PA}$ : Promedio de los últimos tres valores reales de la presión atmosférica a nivel del mar.

Los coeficientes son  $b_{CEV,CA-NM} = 0,1114$  y  $b_{PA,CA-NM} = -0,5363$

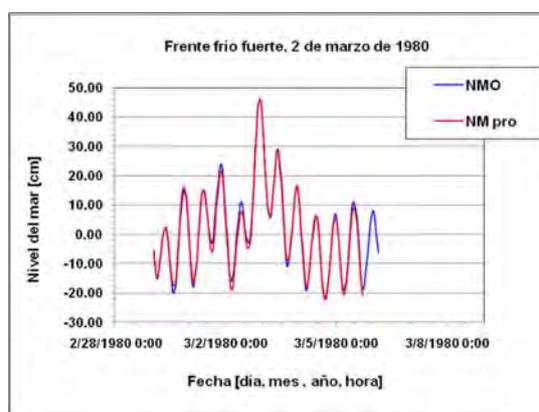
El valor pronosticado de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico (CA-NM pro), para muestras dependientes e independientes, se obtuvo para siete casos de ciclones tropicales y cinco casos de frentes fríos y bajas extratropicales. La selección dependió de los casos más importantes, diversos, y de acuerdo a la disponibilidad de datos primarios.

Los resultados se exponen a continuación (Figuras 6.4.1, a – x). Como se aprecia, los valores pronosticados se aproximan mucho a los reales, tanto para el intervalo de la muestra dependiente (baja extratropical del 13 de marzo de 1993), como para las muestras

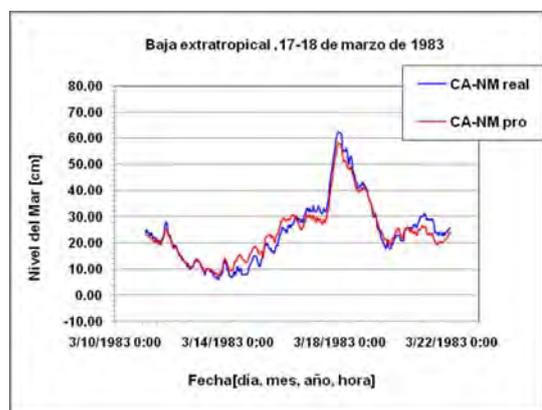
independientes. La estación boya 42003 mide variables hidrometeorológicas en una zona del Golfo de México, por la cual suelen pasar las zonas más activas de los sistemas frontales y de muchos de los ciclones tropicales (Lewis y Hsu, 1992; Moreno, y col., 1997) que afectan las variaciones del nivel del mar, registradas por la estación Siboney en la costa de Ciudad de La Habana.



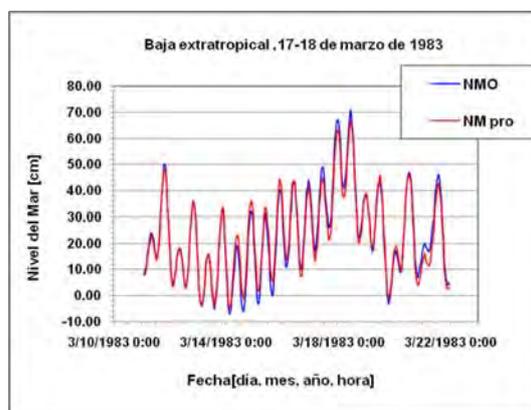
a



b



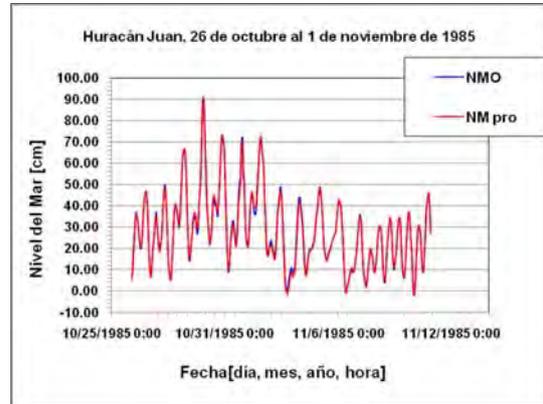
c



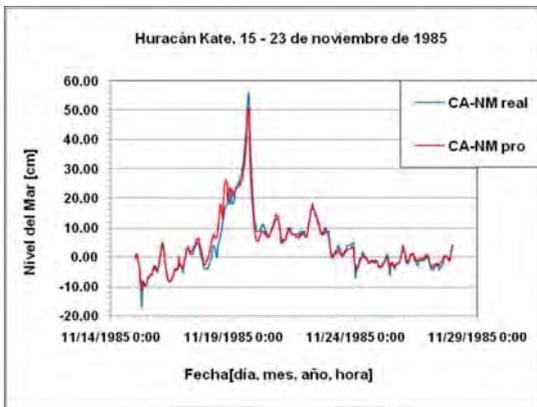
d



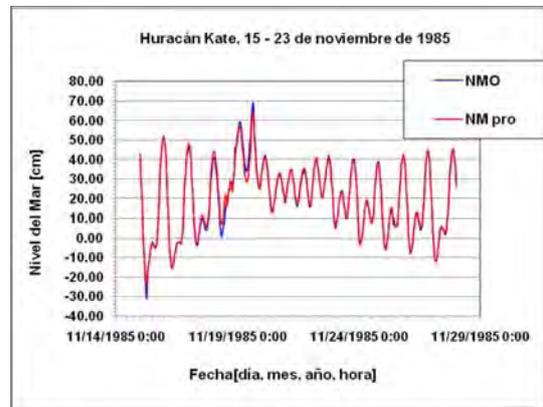
e



f



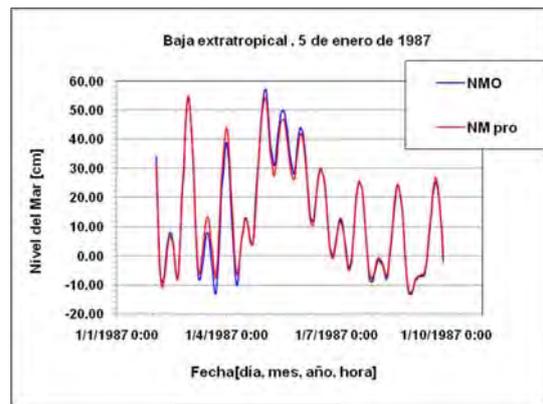
g



h



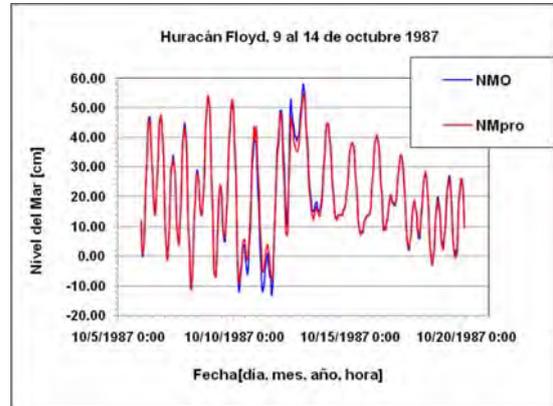
i



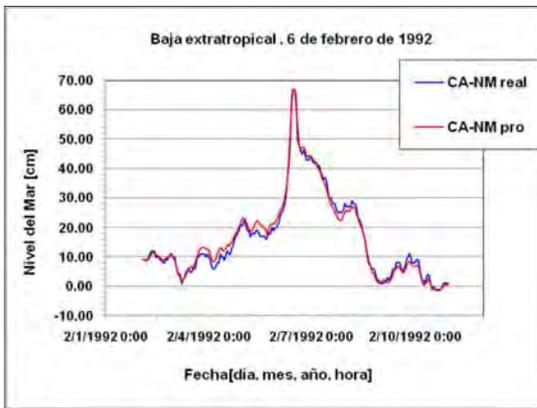
j



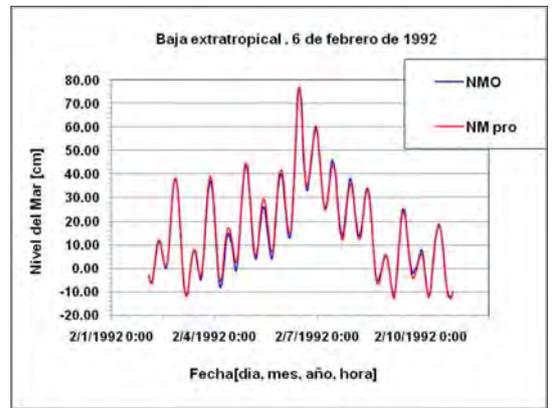
k



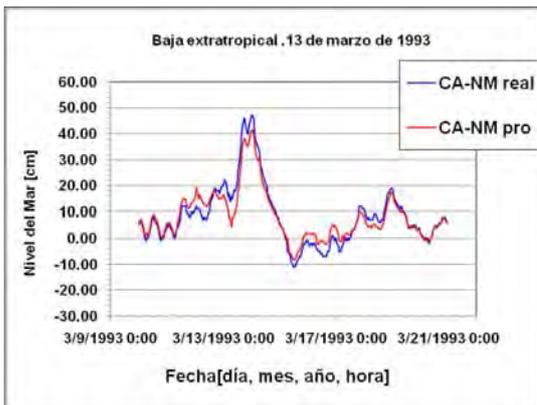
l



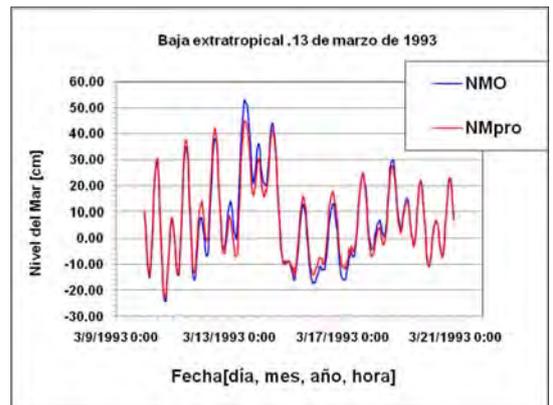
m



n



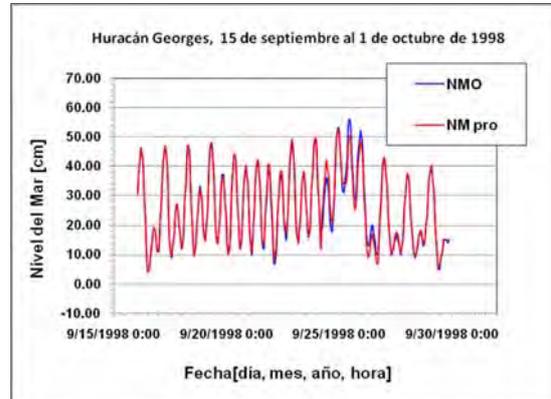
o



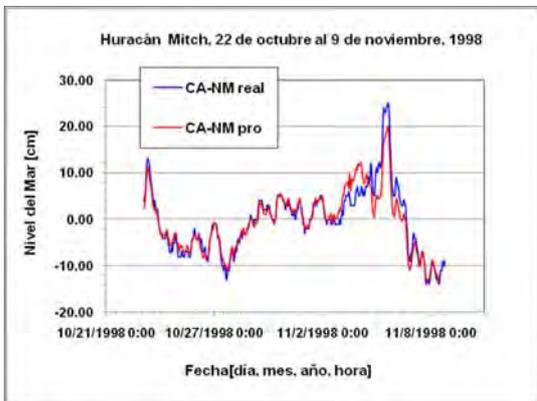
p



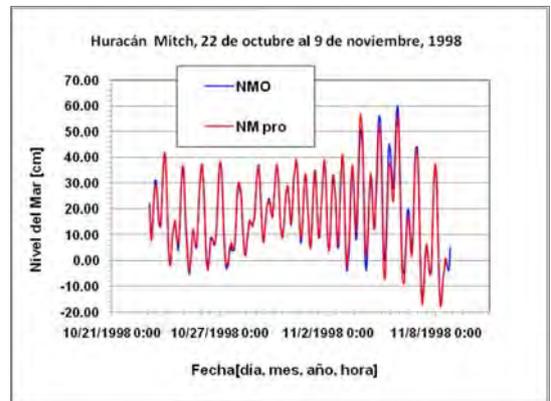
q



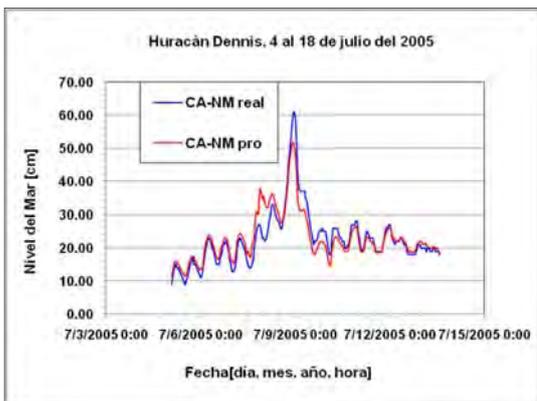
r



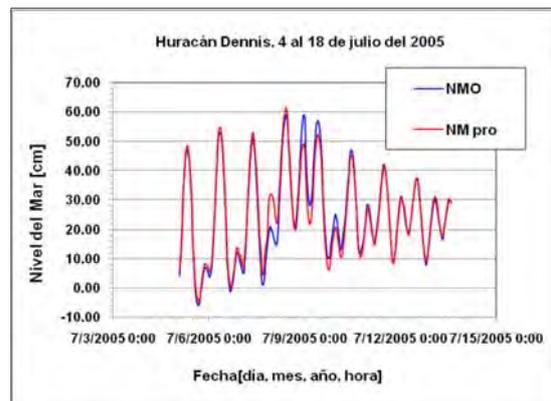
s



t



u



v

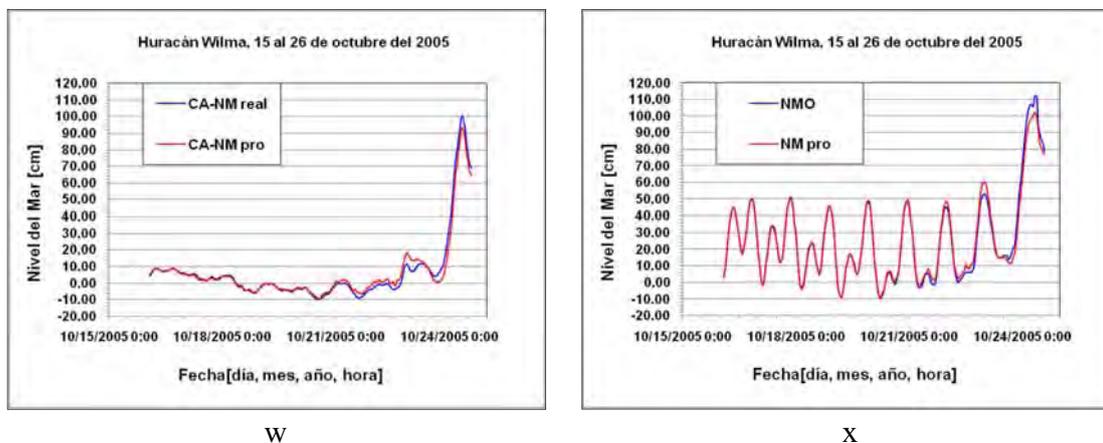


Figura 6.5.1. Resultados de la modelación espectral con un intervalo de la muestra dependiente (año 1993), correspondiente a la baja del 13 de marzo de 1993 (o y p) y con muestras independientes (a – n, q - x) de huracanes de diferentes trayectorias, bajas extratropicales y un frente frío fuerte.

### 6.6. Evaluación del pronóstico.

De acuerdo a los valores calculados del error y de la desviación relativa (2.4.5), los resultados obtenidos con las muestras dependiente e independiente son satisfactorios, en comparación con los de otros autores (Guerman y Levikov, 1988). Para seis y tres localidades de los mares de Ojotsk y de Bering respectivamente, para un total de 36 eventos, los mencionados autores obtuvieron un error promedio de 8,3 cm y para el momento de la altura extrema del nivel del mar, un máximo de 25,0 cm.

Tabla 6.6.1. Valores del error y de la desviación relativa entre el máximo valor extremo del nivel del mar medido, referido al cero geodésico, y su valor pronosticado en cm.

Evento hidrometeorológico	Nivel del mar medido (cm)	Nivel del mar pronosticado (cm)	Error	Desviación relativa
Frente frío fuerte (2/3/1980)	46	46,21	-0,21	0,00
Baja extratropical (17/3/1983)	71	66,61	4,39	0,06
Huracán Juan (29/10/1985)	91	93,25	-2,25	0,20
Huracán Kate (19/11/1985)	59	58,65	0,35	0,32
Baja extratropical (5/1/1987)	57	53,86	3,14	0,06
Huracán Floyd (12/10/1987)	58	54,32	3,68	0,06
Baja extratropical (6/2/1992)	77	77,03	-0,03	0,00
Baja extratropical (13/3/1993)	53	44,94	8,06	0,15
Huracán Georges (25/9/1998)	56	50,04	5,96	0,11
Huracán Mitch (5/11/1998)	60	53,45	3,91	0,07
Huracán Dennis (8/7/2005)	59	58,27	-2,37	-0,07
Huracán Wilma (24/10/2005)	112	99,19	9,76	-0,04

6.7. Posible aplicación en el pronóstico operativo.

Con la finalidad de obtener  $CA-NM(t)$ :

En la práctica operativa, los tres valores reales de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico (CA-NM), para el promedio, se obtendrían como la diferencia

entre el nivel del mar observado (NMO) y la componente periódica de origen astronómico (marea). La hora del valor central del promedio correspondería a la hora de realización del pronóstico. De esta forma se obtendría  $\overline{CA-NM}$  para el término independiente de la ecuación. Las variables meteorológicas para el promedio del término independiente se obtendrían de la estación Casablanca y la estación boya 42003 ( $\overline{PA}$  y  $\overline{CEV}$  respectivamente), de la misma forma. El término independiente de la ecuación de regresión espectral se obtendría al restar los productos del promedio de las últimas tres horas de los valores reales de las variables predictoras, y los correspondientes coeficientes de regresión espectral, al promedio de las últimas tres horas de los valores reales de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico.

El valor pronosticado de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico se obtendría mediante la inclusión en la ecuación de regresión espectral del valor pronosticado de la componente efectiva del viento desde la localidad oceánica  $CEV(t)$  (localidad de ubicación de la boya 42003), que se obtiene a partir de la velocidad y dirección del viento pronosticado y del valor pronosticado de la presión atmosférica a nivel del mar  $PA(t)$  en la estación Casablanca.

Los valores de  $CEV(t)$  y  $PA(t)$  pronosticados constituirían la salida de algún modelo de pronóstico de presión atmosférica y viento (velocidad y dirección, de las cuales se obtiene la componente efectiva de la dirección del viento). El pronóstico de las variables meteorológicas podría efectuarse mediante modelos de pronóstico de campo, que podrían

brindar valores pronosticados cercanos o coincidentes geográficamente con las estaciones mencionadas, como el MM5V3 (Mitrani, y col., 2003).

El valor pronosticado del nivel del mar observado se obtendría mediante la suma de la componente de marea, previamente calculada mediante el método armónico, al valor pronosticado de la componente aperiódica del nivel del mar.

#### 6.8. Limitaciones y consideraciones finales.

De acuerdo a los resultados antes expuestos, los coeficientes obtenidos mostraron resultados satisfactorios para diferentes eventos meteorológicos; sin embargo, aún no se han probado para plazos mayores que 24 horas, ni con variables pronosticadas.

Se reveló la potencialidad de la aplicación de la regresión espectral para predecir a escala local las variaciones aperiódicas del nivel del mar de origen meteorológico, bajo la influencia de eventos sinópticos en Cuba. Si bien es cierto que debe aumentarse el plazo de antelación del pronóstico, los resultados obtenidos pueden considerarse un primer paso de un trabajo a perfeccionar. Podría introducirse el análisis biespectral (Guerman y Levikov, 1988), con la finalidad de poder considerar los efectos no lineales que favorecen el aumento extraordinario del NMO en algunas ocasiones en determinadas localidades (Murty y El – Sabh, 1981; Murty, 1984). Debe tomarse en cuenta también que el perfeccionamiento ulterior depende del mejoramiento de las tecnologías de medición y el acercamiento de las mediciones meteorológicas y mareográficas de carácter permanente, y la ubicación de

nuevos mareógrafos con tecnología de registro de alta frecuencia en tiempo real, durante suficiente tiempo como para obtener mediciones de muchos eventos sinópticos, con la finalidad de obtener coeficientes de regresión espectral en diferentes localidades del país. Los modelos de regresión espectral pueden representar, en un futuro cercano, un complemento de otras tecnologías de modelación más complejas basadas en métodos numéricos para localidades determinadas gracias, entre otras razones, a la posibilidad que éstos tienen de incluir en sí mismos la información sobre la estructura espectral del proceso analizado.

## CONCLUSIONES

1. Las variaciones de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico ocurrieron con mayor intensidad en zonas interiores de la plataforma insular, principalmente en la suroccidental, y en Siboney, para un amplio intervalo de la banda de frecuencias analizada.
2. La estructura espectral de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico resultó similar entre los 0,07 y los 0,70 cpd durante el período analizado, a pesar de las diferentes condiciones físico-geográficas, con sus máximos espectrales más notables en 0,22 y 0,90 cpd.
3. La componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico se caracterizó por una mayor energía para el semestre diciembre – mayo, con un predominio de las variaciones de largo período, que para el semestre junio – noviembre, cuando predominaron las variaciones de corto período.
4. Las variaciones aperiódicas de la presión atmosférica a nivel del mar, a escala local, y las variaciones aperiódicas de la componente efectiva de la dirección del viento y el gradiente de presión en la región oceánica adyacente constituyen las variables de mayor influencia sobre las variaciones aperiódicas del nivel del mar en Siboney.
5. Las variaciones extremas de la componente aperiódica del nivel del mar manifiestan una elevada coherencia en su propagación a lo largo de las costas cubanas, bajo la influencia de eventos sinópticos de diferentes características.
6. En presencia del ENOS ocurren fuertes anomalías de la variabilidad mensual del nivel del mar, debido al establecimiento de condiciones hidrometeorológicas más

favorables para las mismas. Estas anomalías consisten en un aumento anómalo del nivel medio mensual, debido a anomalías negativas de la presión atmosférica principalmente, que no es privativo de los años ENOS y un aumento de la intensidad mensual de las variaciones aperiódicas del nivel del mar.

7. Los coeficientes angulares obtenidos de la ecuación de regresión mostraron resultados satisfactorios para diferentes eventos meteorológicos. Aunque aún no se han probado para plazos mayores que 24 horas, ni con variables pronosticadas, se reveló la potencialidad de la aplicación de la regresión espectral para predecir a escala local, las variaciones aperiódicas del nivel del mar de origen meteorológico, bajo la influencia de eventos sinópticos en Cuba.

### **RECOMENDACIONES**

1. Ampliar las investigaciones abordadas en el presente trabajo, con la introducción del análisis biespectral para determinar los efectos no lineales en las variaciones del nivel del mar.
2. Aplicar los métodos espectrales al análisis y pronóstico de otras variables hidrometeorológicas.
3. Continuar desarrollando las tecnologías de medición y transmisión en tiempo real de las variables hidrometeorológicas, para lograr una introducción efectiva del análisis y pronóstico de las variaciones del nivel del mar mediante métodos espectrales.