

## **CAPÍTULO 1. RESEÑA BIBLIOGRÁFICA**

## **CAPÍTULO 1. RESEÑA BIBLIOGRÁFICA**

El objetivo del presente capítulo es analizar la evolución y el estado del conocimiento acerca del análisis y pronóstico de las variaciones aperiódicas del nivel del mar de origen meteorológico, mediante métodos espectrales a partir de mediciones directas.

La bibliografía internacional reporta un rápido aumento de las investigaciones acerca de las variaciones aperiódicas del nivel del mar a partir de los años 60. Con los trabajos de Hamon, (1962), Hannan (1963), Hamon y Hannan (1963) y Groves y Hannan (1968), se inició la aplicación de la regresión espectral a series de nivel del mar y parámetros meteorológicos. Éstos sirvieron de base a estudios posteriores (Miyata y Groves, 1971; Wang, 1979; Chao y Pietrafesa, 1980; Komen, 1980; Hsue y Romea, 1983; Smith, 1983; Efimov, 1985; Guerman y Levikov, 1988; Pizarro y col., 1994; entre otros). No obstante, la inmensa mayor parte de los trabajos publicados internacionalmente se han dedicado a regiones de las latitudes altas y medias y, en comparación, muy pocos a zonas tropicales (Christensen, y col. 1983; Ramírez, 1991).

Los estudios antes mencionados se realizaron gracias a la disponibilidad de series de tiempo de alturas horarias del nivel del mar, obtenidas de los registros de los mareógrafos en las zonas costeras, y al desarrollo de métodos de tratamiento y análisis espectral de series de tiempo (Groves, 1955; Jenkins y Watts, 1968; Matuchevski y Pribalski, 1968; Otnes y Enochson, 1982; Newland, 1983; Rory y Thompson, 1983; Dotsenco, 1983;

Bendat y Piersol, 1986; Abuziarov, y col., 1988). Sin embargo, la modelación numérica ha alcanzado mayor difusión que la modelación espectral en los últimos años.

En la bibliografía nacional, en los últimos años aparecieron diversos estudios acerca de las inundaciones costeras, con énfasis en el oleaje y la surgencia de tormenta, mediante métodos estadísticos, espectrales y numéricos (Morales, y col., 1995; Juantorena y Beauballet, 1996; Portela, 1998; Juantorena, y col., 1999; Mitrani, y col., 1999; Mitrani, y col., 2000; Juantorena, y col. 2000a y b; Mitrani, y col., 2001; Pérez, y col., 2003; Juantorena y Rosales, 2003; Salas, y col., 2004; Salas, y col., 2005; Salas, y col., 2006). Sin embargo, en ellos no se abordó el análisis de los datos de mediciones mareográficas, debido a que no constituía objetivo o porque dicho análisis no se tomó en cuenta como apoyo de los estudios realizados.

En Cuba, los primeros estudios sobre las variaciones del nivel del mar asociadas a los eventos de escala sinóptica mediante mediciones directas se iniciaron en la década de los 70. Moreno y Salas (1976) se limitaron a un análisis descriptivo del comportamiento de la altura de las aguas bajo la influencia de algunos intensos huracanes. No fue hasta inicios de los años 90 que aparecieron los primeros resultados de la aplicación de los métodos de filtrado numérico y espectrales a series de tiempo de alturas horarias del nivel del mar (Victoria y col., 1990; Moreno y col., 1997; Hernández y Díaz 2001a y b; Ramírez y Candela, 2003; Hernández y Díaz, 2003; AMA, 2005; Ramírez y Hernández, 2007).

El Niño - Oscilación del Sur (ENOS) produce perturbaciones oceánicas a escala global (Voitiriez y Guy ,1999; Voitiriez, 2003), entre las cuales se encuentran las anomalías mensuales aperiódicas del nivel del mar del Océano Pacífico (Wyrki, 1977; Enfield y Allen, 1980 y 1983). Se ha comprobado la ocurrencia de anomalías mensuales aperiódicas del nivel del mar durante los años ENOS en algunas localidades de Cuba (Blázquez, 1989; Hernández y Díaz, 2001a y b); aunque estos estudios no alcanzaron a profundizar en la posible relación entre la ocurrencia del ENOS, las anomalías mensuales aperiódicas y las variaciones aperiódicas del nivel del mar de origen meteorológico.

En resumen, puede concluirse que si bien ya existen las premisas teóricas y metodológicas necesarias para el desarrollo del análisis y pronóstico de las variaciones aperiódicas del nivel del mar de origen meteorológico a partir de mediciones directas, aún no ha sido suficientemente abordado en las zonas tropicales ni en Cuba.

## **CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS**

## **CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS**

El objetivo de este capítulo consiste en exponer la información, las características de los datos, los fundamentos teóricos y los métodos y procedimientos con los cuales se cumplirá el objetivo general de la presente tesis y sus objetivos específicos.

### **2.1. Características de la región de estudio.**

Cuba se encuentra en el Mediterráneo Americano, entre los 19° 49' 36" y 23° 17' 09" de latitud N, y los 74° 07' 52" y 84° 54' 57" de longitud W (Centella, y col., 2001), encontrándose su territorio entre el Golfo de México, el estrecho de La Florida y los canales de San Nicolás y Viejo de Bahamas al norte; el Mar Caribe occidental y el estrecho de Colón al sur, y el Canal de Yucatán y el Paso de Los Vientos al este y al oeste. El archipiélago cubano está formado por la Isla de Cuba, la Isla de la Juventud y más de 1 600 islas, islotes y cayos que poseen en su conjunto una extensión superficial de 110 922 km<sup>2</sup>. A la Isla de Cuba corresponde un área aproximada de 105 007 km<sup>2</sup> y a Isla de la Juventud, 2 200 km<sup>2</sup>. El área de los restantes cayos e islotes es de 3 715 km<sup>2</sup>, mientras que la plataforma insular abarca 67 832 km<sup>2</sup>. La costa norte posee una longitud de 3 209 km y la sur 2 537 km, para un total de 5 746 km aproximadamente (Furrazola y Núñez, eds., 1997).

La frontera exterior de la zona costera cubana se encuentra definida por el abrupto declive del talud insular (Toledo, y col., 2005), destacándose cuatro zonas de plataforma poco

profundas. La plataforma noroccidental se extiende unos 240 km desde Cabo de San Antonio hasta Bahía Honda. Su amplitud varía de 50 a 2 km de oeste a este. Presenta una sinuosa línea de costa y una profundidad de 2 a 6 m en su mayor parte, con excepción del Golfo de Guanahacabibes donde alcanza 26 m (Blázquez, 1981). El Archipiélago de Los Colorados limita parcialmente su comunicación con las aguas oceánicas adyacentes. La plataforma nororiental posee 1 500 km<sup>2</sup> y se extiende 465 km desde la Bahía de Cárdenas hasta la Bahía de Nuevitas. La profundidad de sus lagunas costeras varía entre 3 y 5 m, y el intercambio de las mismas con el océano se encuentra parcialmente limitado por el Archipiélago Sabana-Camagüey. La plataforma suroriental se extiende desde Casilda hasta Cabo Cruz, posee un área aproximada de 18 000 km<sup>2</sup> y una profundidad media de 15 m. Se encuentra dividida en los Golfos de Ana María y Güacanayabo por una franja de aguas menos profundas y posee numerosos cayos y bajos fondos (Lluis, 1977); su comunicación con el océano se encuentra parcialmente limitada por el Archipiélago de los Jardines de la Reina y bajos como el Médano de la Vela. La plataforma suroccidental posee un área de 20 850 km<sup>2</sup> y una profundidad media de 6 m (Lluis, 1972), y entre sus cayerías se destaca el Archipiélago de Los Canarreos.

El clima de Cuba es tropical, estacionalmente húmedo, con influencia marítima y rasgos de semicontinentalidad debido a la influencia de las masas de aire continentales, con influencia estacional de las zonas de circulación tropical y extratropical. Entre noviembre y abril son más notables las variaciones bruscas del tiempo diario, debido al paso de sistemas frontales asociados a centros de bajas presiones extratropicales y a la influencia anticiclónica de origen continental, que se alterna con la del anticiclón subtropical del

Atlántico Norte. De mayo a octubre, por el contrario, se presentan pocas variaciones en el tiempo diario, con una mayor influencia del anticiclón subtropical del Atlántico Norte y los cambios más importantes se deben a la presencia de disturbios en la circulación tropical: ondas del este y ciclones tropicales (ACC, 1989; Lecha, y col., 1994; Centella, y col., 2001).

Las zonas de mayor frecuencia de afectación por ciclones tropicales se encuentran entre el centro del Mar Caribe occidental y el sur del estado norteamericano de Luisiana (Lewis y Hsu, 1992), coincidiendo en gran parte con una zona oceánica, en la cual la circulación anticiclónica de las aguas impone una temperatura mayor a las capas superiores de la columna de agua (Sukhovey, 1980 y 1986), favorable para el desarrollo de los ciclones tropicales. En el primer y cuarto trimestre del ciclo anual, la zona ciclogénica más importante de las bajas extratropicales del Golfo de México se encuentra en su región noroccidental (Lewis y Hsu, 1992).

En aguas cubanas predomina la marea mixta diurna y semidiurna. En general, la amplitud de la marea en la parte norte del archipiélago es como promedio mayor que en la parte sur, y la misma varía de menos de 25 cm en la plataforma suroccidental hasta 65 cm en la plataforma nororiental (Rodríguez y Rodríguez, 1983). Las componentes de largo período solar anual (Sa) y solar semianual (Ssa) determinan la variabilidad estacional, principalmente en la región noroccidental (ACC, 1989).



Las características geográficas, oceanográficas y meteorológicas de la región de estudio poseen una singular importancia para el análisis y pronóstico de la generación y propagación de las variaciones aperiódicas del nivel del mar. En este sentido, es de destacar que Cuba se encuentra en el centro de una activa zona de eventos meteorológicos, que además poseen un comportamiento estacional peculiar, predominando la influencia de los mismos en una zona u otra del archipiélago, según diversos factores. Por otra parte, la marea de origen astronómico es en general de poca amplitud, lo cual deja el papel principal en la formación de las variaciones extremas del nivel del mar a la componente aperiódica, durante estados del tiempo severos. Debe añadirse que las particularidades de la plataforma insular cubana le confieren al archipiélago disímiles condiciones para el comportamiento de las variaciones aperiódicas, ya que las ondas largas no se disipan en las amplias zonas de aguas someras, mientras que las variaciones de altas frecuencias sí (Efimov, 1985).

## 2.2. Fundamentos teóricos.

Los fundamentos teóricos del presente trabajo consistieron en la teoría de los procesos aleatorios estacionarios (Bendat y Piersol, 1986) y en los conceptos de la dinámica y estructura espectral del nivel del mar (Efimov, 1985; Guerman y Levikov, 1988; Pugh, 1996; IOC, 2006).

Los procesos físicos se dividen en determinísticos, que se describen y se pronostican mediante expresiones matemáticas exactas, y aleatorios, los cuales hasta ahora no pueden describirse con exactitud, ya que cada valor de los mismos representa uno de muchos

posibles resultados, o sea valores aleatorios (Bendat y Piersol, 1986). Los procesos aleatorios se dividen en estacionarios y no estacionarios. Los estacionarios se pueden enunciar de la siguiente forma: Dado un conjunto de muestras de un proceso aleatorio determinado, el valor medio (momento puro de primer orden) del proceso aleatorio en el momento  $t_1$  puede ser hallado mediante la suma de los valores simultáneos de cada muestra del conjunto para dicho momento  $t_1$  y la división de esta suma entre el número de realizaciones. De la misma forma, la función de autocorrelación entre los valores del proceso aleatorio (momento mixto de primer orden) en dos momentos diferentes del tiempo, se determina mediante el promedio para el conjunto del producto de los valores simultáneos del proceso en los momentos  $t_1$  y  $t_1 + \tau_1$  (Bendat y Piersol, 1986).

En los procesos aleatorios, débilmente estacionarios o estacionarios en sentido amplio, el momento de primer orden es constante, y el momento mixto de primer orden (función de autocorrelación) no depende del momento inicial  $t_1$  y sólo depende del desplazamiento de la función de autocorrelación  $\tau$ . En los procesos aleatorios estacionarios en sentido estrecho, el momento mixto de primer orden tampoco depende de  $\tau$ . En la mayor parte de las aplicaciones, la demostración de la condición de estacionaridad en sentido amplio es suficiente para validar la estacionaridad en sentido estrecho (Bendat y Piersol, 1986).

Si el proceso aleatorio es estacionario y los resultados de los primeros momentos para sus diferentes realizaciones son iguales, también es ergódico. Sólo los procesos estacionarios son ergódicos, y esta condición hace posible la caracterización de los mismos a partir de

una sola muestra; lo cual es valedero cuando se consideren en el análisis sólo los primeros y segundos momentos (puros y mixtos) de la distribución de los valores aleatorios (Bendat y Piersol, 1986).

Las diferentes componentes de origen astronómico, meteorológico, climatológico, oceanográfico y geológico del nivel del mar pueden ser determinísticas o aleatorias; y pueden ser a su vez, periódicas y aperiódicas. De acuerdo a la frecuencia (o período, si se refiere al dominio del tiempo) que las caracteriza, hallan su ubicación en el espectro energético. La marea de origen astronómico, que se ubica en las altas frecuencias, es un proceso periódico y determinístico. La variabilidad estacional del nivel del mar, debido al viento, las corrientes marinas y al intercambio de calor y humedad océano-atmósfera, que se ubica en las bajas frecuencias, es un proceso aleatorio periódicamente correlacionable (Guerman y Levikov, 1988). Las ondas cortas y largas generadas por los eventos meteorológicos, las ondas de tsunami y las anomalías de origen climatológico son procesos aperiódicos; y se distribuyen en una amplia zona del espectro de frecuencias de las variaciones del nivel del mar, desde las altas hasta las bajas frecuencias. La tendencia del nivel medio del mar, a largo plazo, constituye un proceso aleatorio no estacionario que se encuentra en el extremo de las bajas frecuencias. De acuerdo a lo antes expuesto, las variaciones del nivel del mar representan un complejo proceso que en su conjunto puede clasificarse como armónico, sobre un fondo de ruido aleatorio no estacionario, independientemente de la naturaleza de sus diferentes componentes por separado.

En la monografía de Guerman y Levikov (1988), se abordan de forma amplia y profunda los métodos espectrales, aplicados al análisis y modelación de las variaciones aperiódicas del nivel del mar de origen meteorológico en la escala sinóptica de frecuencias. Aunque sólo se limita a regiones no tropicales, representó una importante fuente de fundamentos teóricos y metodológicos para el presente trabajo. También se tomaron como fuentes conceptuales importantes a Julian y Murphy (1972), IOC (1985 y 2006), Efimov (1985) y Pugh (1996).

### 2.3. Datos e información primaria.

En calidad de información primaria, se utilizaron series de datos de alturas horarias del nivel del mar, de un año a cuatro décadas de duración, registrados por estaciones de la Red Mareográfica Nacional en 14 localidades del archipiélago cubano (Figura 2.3.1, Tabla 2.3.1), mediante mareógrafos del sistema de flotador y contrapeso (IOC, 1985; Anexo 1). Las series de tiempo de alturas horarias que se obtienen de los mismos representan, hasta el momento, la principal fuente de datos para las investigaciones acerca del nivel del mar (IOC, 2006). A estos datos se les aplicaron los métodos de control de la calidad establecidos por la Oficina Nacional de Hidrografía y Geodesia del MINFAR (Geocuba Geodesia, 200; IOC, 1985; IOC, 2006).

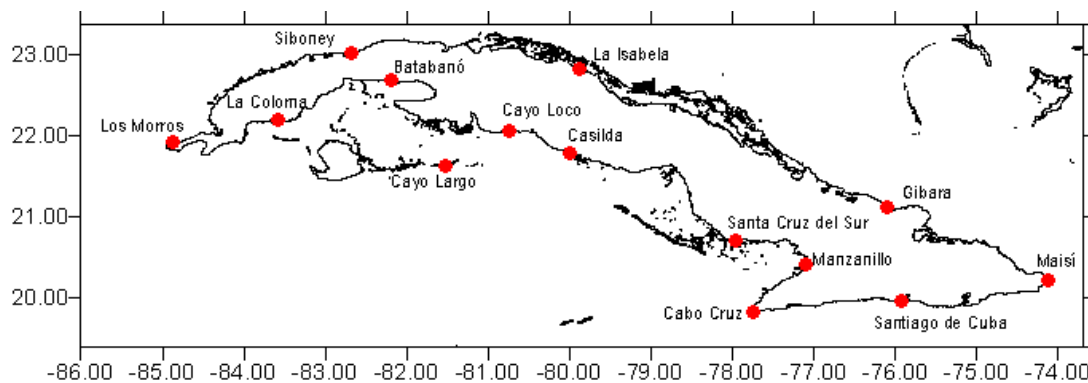


Figura 2.3.1. Distribución geográfica de las estaciones de la Red Mareográfica Nacional, cuyos registros se utilizaron en el presente trabajo.

Tabla 2.3.1. Principales características de los registros mareográficos.

Estación Mareográfica	Duración de los registros				Latitud (N)	Longitud (W)
	Desde	Hasta	Años	Cero [cm]		
Los Morros	1973	2000	28	-38	21°54,0'	84°54,4'
Siboney	1966	2005	40	-53	23°05,6'	82°28,2'
La Isabela	1973	2008	36	-62	22°56,4'	80°00,8'
Gibara	1976	2008	33	-92	21°06,5'	76°07,5'
Maisí	1995	2001	7	-135	20°14,8'	74°08,7'
Santiago de Cuba	1993	2008	16	-153	19°59,1'	75°52,5'
Cabo Cruz	1993	2008	16	-88	19°50,4'	77°43,7'
Manzanillo	1993	2008	16	-128	20°20,4'	77°08,8'

Santa Cruz del Sur	1994	2001	8	-88	20°42,0'	77°58,6'
Casilda	1972	1995	24	-95	21°45,2'	79°59,5'
Cayo Loco	1992	2008	17	-155	22°09,1'	80°27,3'
Cayo Largo	1983		1	-126	21°37,3'	81°33,9'
Batabanó	1991		1	-68	22°40,5'	82°17,5'
La Coloma	1991	2001	11	-100	22°14,2'	83°34,3'

Los mareógrafos del sistema de flotador y contrapeso captan la marea astronómica y las variaciones de la componente aperiódica de origen meteorológico, la cual incluye los efectos de la propagación de la onda de surgencia de tormenta y de la acumulación de agua asociada a las marejadas en condiciones severas del estado del tiempo, quedando excluidas totalmente las variaciones de alta frecuencia del oleaje local.

En calidad de información meteorológica, se utilizaron datos horarios medidos entre 1980 y 1993 y datos trihorarios registrados entre 1994 y el 2008 de la presión atmosférica a nivel del mar y de velocidad y dirección del viento, en la estación Casablanca, de Ciudad de La Habana. La información acerca de los ciclones tropicales se tomó de fuentes de la NOAA mediante Internet (<http://weather.unisys.com/hurricane/atlantic/>). Los datos de los sistemas frontales que han afectado a Cuba fueron facilitados amablemente por la Dra. Cecilia González y la M.C. Miriam Teresita Llanes, del Instituto de Meteorología. Las series temporales de índices climáticos se tomaron del sitio de Internet [http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD\\_NOAA\\_NWS\\_CPC\\_SOI.html](http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD_NOAA_NWS_CPC_SOI.html).

## 2.4. Los Métodos.

Los procesos físicos pueden representarse en función del tiempo o de la frecuencia. Las series de datos de las variables que caracterizan a los procesos físicos se representan mediante la expresión:

$$x_n = x(t_0 + nh) \quad (2.4.1)$$

Donde:  $x_n$  - Valores numéricos de la serie ( $n=1,2,3,\dots,N$ );  $N$  - número total de los valores de la serie;  $t_0$  - coordenada temporal del valor inicial de la serie;  $h$  - intervalo que separa los valores discretos, mediante el cual se determina la frecuencia límite de Naiquist ( $f_c=1/2h$ ).

Por lo tanto,  $x_n$  es una función del tiempo ( $x_n = x(t)$ ).

### 2.4.1. Restablecimiento de valores ausentes de las series temporales de alturas horarias del nivel del mar.

Con la finalidad aplicar el filtrado numérico y el análisis estadístico y espectral, fue necesario restablecer la continuidad numérica de algunas de las series de alturas horarias de nivel del mar. Para ello, se tomaron en consideración las características físicas de las componentes del proceso analizado. Las oscilaciones periódicas de la marea de origen astronómico representan la mayor parte de la energía del espectro de las variaciones del nivel del mar (Guerman y Levikov, 1988), y constituyen un proceso determinístico de fácil

restitución. La componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico en el intervalo sinóptico de frecuencias constituye, en orden de importancia, la segunda componente, pero representa un complejo proceso aleatorio de más compleja restitución. Por esta razón, y tomando en consideración la experiencia de Enfield y Allen (1983), el restablecimiento de la continuidad numérica de las series con interrupciones se limitó sólo a su componente periódica, con valores horarios de marea, mediante el Sistema de Análisis de Mareas de la Universidad de Hawaii (Caldwell, 1998), a partir de 68 constituyentes armónicos.

A los efectos de este trabajo, se consideraron inaceptables para el análisis estadístico y espectral los meses con interrupciones de 15 días o más. Los meses con interrupciones de 7 a 14 días también se consideraron inaceptables si durante los mismos ocurrió la afectación de algún evento extremo. Se aceptaron los meses con menos de 7 días de interrupción. No se consideraron aceptables para el procesamiento estadístico y espectral las series anuales de al menos un mes no aceptable.

2.4.2. Obtención de la componente aperiódica del nivel del mar, de la presión atmosférica a nivel del mar y del viento en la escala sinóptica de frecuencias.

Las series horarias de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico en las escala sinóptica (CA-NM), para la banda de frecuencias comprendida entre los 0,07 cpd ( $T=15$  d) y 1 cpd (24 horas), se obtuvieron mediante un esquema de filtrado consistente en el filtro de Doodson de 39 coeficientes de ponderación, el cual elimina



eficazmente las oscilaciones diurnas y semidiurnas de la marea astronómica y deja intactas las componentes periódicas semianuales y anuales del nivel del mar (Groves, 1955; Matuchevski y Pribalski, 1968, Guerman y Levikov, 1988; Pugh, 1996), y una media móvil de orden  $n=361$ , que excluyó dichas componentes de baja frecuencia (Guerman y Levikov, 1988).

Las series horarias de la presión atmosférica a nivel del mar (PA), y de las componentes meridional ( $W_y$ ) y zonal ( $W_x$ ) del viento, se filtraron con la finalidad de excluir la componente de alta frecuencia de las oscilaciones de la marea barométrica, y la componente de baja frecuencia de las variaciones estacionales, mediante un esquema de filtrado integrado de dos filtros del tipo media móvil de orden  $n=27$  y  $n=361$  respectivamente. Como resultado, se obtuvieron las componentes aperiódicas de la PA (CA-PA), de la  $W_x$  (CA- $W_x$ ) y de la  $W_y$  (CA- $W_y$ ) para una banda de frecuencias de 0,07 – 1,00 cpd, comparables con las variaciones de la CA – NM.

2.4.3. Caracterización de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico en la escala sinóptica de frecuencias y de la influencia de la presión atmosférica y del viento.

La caracterización de las variaciones aperiódicas del nivel del mar de origen meteorológico en la escala sinóptica de frecuencias y de las anomalías mensuales del nivel del mar, así como la caracterización de la influencia de los factores meteorológicos, se realizó mediante la estadística y el análisis espectral aplicados a los procesos aleatorios estacionarios

(Jenkins y Watts, 1968; Bendat y Piersol, 1986 y 1986; Otnes y Enochson, 1983; Newland, 1983; Efimov, 1985; Guerman y Levikov, 1988).

Se calcularon los momentos puros y mixtos de primer orden, el valor medio  $\bar{X}$  y la función de autocorrelación  $\hat{R}_r$  (Anexo 2, 2.1 y 2.2), de todas las series anuales y de las series semi-anales correspondientes al período del año junio – noviembre, que comprende la temporada ciclónica, y al período diciembre – mayo, durante el cual ocurren con mayor frecuencia los sistemas frontales.

$\hat{R}_r$  caracteriza la relación lineal del valor de un proceso físico en un momento dado del tiempo con su valor en otro momento (Bendat y Piersol, 1986). El gráfico de  $\hat{R}_r$  de un proceso armónico, como la marea, se repite cíclicamente y el de un proceso aleatorio, como las variaciones aperiódicas del nivel del mar, tiende a cero.

También se calcularon los momentos puros mixtos (Anexo 2, 2.4 y 2.5) de segundo orden, la varianza  $\sigma^2$  la función espectral  $\hat{G}_k$ . Con la finalidad de suavizar la función de correlación se utilizó la ventana de Parzen (Anexo 2, 2.6).

En Física, la frecuencia y la amplitud de las variaciones determinan la intensidad de un proceso, la cual puede estimarse elementalmente mediante la varianza (Bendat y Piersol,

1986). Como  $\hat{G}_k$  se expresa en el dominio de las frecuencias, caracteriza la estructura espectral, la distribución de energía o la variabilidad medio cuadrática de la muestra para la banda de frecuencias analizada. O sea, caracteriza la distribución por frecuencias de la intensidad de las variaciones. La integral del espectro energético tiene un valor finito que es proporcional al área comprendida entre el gráfico de la función espectral y los ejes de coordenadas, por lo que caracteriza también la intensidad promedio del proceso analizado.

Los gráficos de  $\hat{G}_k$  se elaboraron con una escala logarítmica, ya que su transformación logarítmica posee una distribución más cercana a la normal que su distribución original. En los procesos estacionarios  $\hat{G}_k$  se relaciona con  $\hat{R}_r$  a través de la Transformada de Fourier.

Se calcularon además las funciones de coherencia, de coherencia múltiple y parcial (Anexo 2, 2.7, 2.8 y 2.9), que determinan el nivel de la relación lineal entre dos variables para valores específicos de frecuencia (Bendat y Piersol, 1986; Abuziarov, 1988). La función de coherencia da la medida de la relación lineal, sin tomar en consideración la influencia de otros procesos en la entrada; mientras que la función de coherencia parcial da una medida de la relación lineal entre los procesos de entrada y el de salida, cuando los primeros son correlacionables. La función de coherencia múltiple muestra el nivel de respuesta lineal del proceso de salida a los procesos de entrada (Bendat y Piersol, 1986).

Se determinaron los intervalos de confianza de cada función (Jenkins y Watts, 1968; Bendat y Piersol, 1986; Otnes y Enochson, 1983; Guerman y Levikov, 1988) de cada característica espectral estimada.

Se estimó el aporte relativo (AR) de la variabilidad mensual y anual de las variaciones aperiódicas a la variabilidad mensual y anual del nivel del mar observado, como la razón de la varianza de la primera con relación a la varianza del segundo, expresado en porcentaje. El AR permite conocer la contribución lineal de la intensidad mensual y anual de las variaciones aperiódicas a la intensidad mensual y anual del nivel del mar observado (Wang, 1979).

#### 2.4.4. Caracterización de las anomalías mensuales y anuales del nivel del mar.

Con el propósito de caracterizar la variabilidad de las anomalías mensuales y anuales del nivel del mar, se calcularon las series de valores medios diarios (VMD), mediante la aplicación del filtro de Doodson X0 a las series de alturas horarias de nivel del mar de 10 años o más de duración (IOC, 2006). Las series de valores medios diarios representan adecuadamente las variaciones aperiódicas del nivel del mar de origen meteorológico (Guerman y Levikov, 1988). Tomando en consideración que los momentos puros de primer y segundo orden de los procesos físicos representan la componente estática y dinámica de los mismos (Bendat y Piersol, 1986), se obtuvieron las series de valores medios mensuales (VMM) y de la varianza mensual (VM), a partir de las series de VMD. A continuación, se

calcularon las series de las anomalías del valor medio mensual (AVMM), mediante la sustracción del ciclo anual medio del nivel del mar (CAM) (Enfield y Allen, 1980). A partir de las AVMM, se calcularon las series de anomalías del valor medio anual (AVMA) y a partir de los VMD se calcularon las series de la varianza anual (VA). La variabilidad estacional del nivel del mar está constituida por la tendencia, que es un proceso no estacionario (Bendat y Piersol, 1986), una componente periódica, representada por su ciclo anual medio (CAM), y un residuo aleatorio representado por AVMM.

2.4.5. Pronóstico de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico en la escala sinóptica de frecuencias.

La presencia de máximos sinópticos en las funciones espectrales de las variaciones aperiódicas del nivel del mar, y la existencia de una estrecha relación lineal de las mismas con el viento y la presión atmosférica, constituye la base del cálculo y pronóstico de las variaciones extremas de la componente aperiódica del nivel del mar (Guerman y Levikov, 1988). Los métodos espectrales permiten considerar las diferencias entre las relaciones de distintas componentes espectrales de la presión y del viento con las variaciones del nivel del mar, por lo que la regresión espectral permite tomar en consideración el efecto del ruido. La idea de modificar el modelo de la regresión lineal con el objetivo de estimar o tomar en cuenta la estructura interna del proceso estudiado, en este caso del nivel del mar, fue propuesta inicialmente en Hamon y Hannan (1963).

Si se considera un modelo del tipo

$$y(t) = a + \sum_{j=1}^N z_j(t)b_j + e(t) \quad (2.4.2)$$

Donde  $y(t)$ - proceso en la salida del sistema lineal,  $a$  - miembro independiente de esta ecuación,  $j$  - número de orden de los procesos en la entrada del sistema,  $N$  – número de procesos en la entrada del sistema,  $z_j(t)$ - procesos de entrada del sistema en función del tiempo,  $b_j$  - coeficiente angular de la ecuación,  $e(t)$ - proceso residual no observable en función del tiempo.

La ecuación (2.4.9) se cumple sólo para una parte del intervalo de frecuencias, ya que  $y(t)$  está formada por dos componentes. La primera de éstas, las variaciones aperiódicas del nivel del mar de origen meteorológico, que corresponde al intervalo sinóptico de frecuencias o intervalo de las frecuencias medias, sólo está relacionada con los procesos de entrada  $z_j(t)$ . La segunda corresponde a las altas y bajas frecuencias, y a las mismas pertenecen la marea y las variaciones estacionales y de mayor período, respectivamente. Cuando en calidad de procesos de entrada se cuenta con las variaciones del viento y/o de la presión atmosférica, debido a los eventos de escala sinóptica, las altas y bajas frecuencias representan un ruido.

El ruido se estima mediante la determinación de los Coeficientes Angulares de la Ecuación de Regresión, como las estimaciones medias ponderadas de la parte real de la Función de Transferencia del sistema en el intervalo de frecuencias analizado. En este caso del

intervalo sinóptico de frecuencias, en calidad de factores de ponderación se utiliza la relación señal/ruido. La mejor aproximación serán los valores de  $b_j(k)$  en la banda de frecuencias, donde la función que expresa la relación señal/ruido alcanza su máximo valor (Hamon y Hannan, 1963). Ésta es la premisa de la utilización de las características espectrales de los procesos analizados en la determinación de los coeficientes de la ecuación de regresión lineal.

Para un modelo de regresión espectral de dos entradas (Guerman y Levikov, 1988), se tiene que:

$$y(t) = a + b_{zy} z(t) + b_{vy} v(t) \quad (2.4.3)$$

El miembro independiente se halló mediante la fórmula:

$$a = \bar{y} - b_{zy} \bar{z} - b_{vy} \bar{v} \quad (2.4.4)$$

Donde:  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$ ,  $\bar{v}$  - valor medio del proceso a pronosticar  $y(t)$  y de los procesos de entrada  $z(t)$  y  $v(t)$ .

Los coeficientes de la ecuación de regresión se determinan para series largas de observaciones, que incluyan muchos eventos meteorológicos (Guerman y Levikov, 1988).

Con la finalidad de facilitar el pronóstico operativo, a partir de variables pronosticadas en su forma más sencilla posible, se obtuvieron los coeficientes de regresión espectral a partir de la muestra dependiente, con valores de las variables meteorológicas sin filtrado previo alguno. Con relación a la variable nivel del mar, se tomó en consideración que los efectos no lineales pueden producirse bajo determinadas condiciones sinópticas de intensificación de la velocidad del viento (Belov y Filippov, 1985). En tales casos, ocurre una intensificación de las variaciones de alta frecuencia del nivel del mar ( $f > 1,00 \text{ cpd}$ ). Por esta razón, se aplicó un esquema de filtrado que resulta menos riguroso en cuanto a la exclusión de las oscilaciones periódicas de la marea, pero más conservador con respecto a las variaciones aperiódicas comprendidas en el intervalo de altas frecuencias. Dicho esquema consistió simplemente en la sustracción de las oscilaciones de la marea, calculadas previamente mediante el análisis armónico según Caldwell (1998), a las variaciones del nivel del mar observado (Murty y El-Sabn, 1981).

El error se calculó mediante la sustracción del valor calculado (pronosticado) al valor observado (Abuziarov, y col., 1988); mientras que la desviación relativa (Belov y Filippov, 1985) entre los valores observados del NMO o de su CA-NM y sus correspondientes valores calculados (pronosticados), o sea NMO pro y CA-NM pro respectivamente, se calculó mediante las siguientes fórmulas:

$$\Delta\zeta = \frac{\zeta_{NMO} - \zeta_{NMpro}}{\zeta_{NMO}} \quad \Delta\zeta = \frac{\zeta_{CA-NM} - \zeta_{CA-NMpro}}{\zeta_{CA-NM}} \quad (2.4.5)$$



Donde:  $\Delta\zeta$  – Desviación relativa;  $\zeta_{NMO}$ ,  $\zeta_{NMOpro}$  Valores observado y pronosticado del nivel del mar;  $\zeta_{CA-NM}$ ,  $\zeta_{CA-NMpro}$  Valor calculado o pronosticado de la CA-NM.

Todos los cálculos se realizaron mediante programas elaborados en Digital Visual Fortran VII y los gráficos mediante el sistema EXCELL.

Se puede concluir que se cuenta con los fundamentos teóricos y metodológicos y con la información necesaria para responder al objetivo general y los específicos de la presente tesis.

**CAPÍTULO 3. VARIABILIDAD DE LA COMPONENTE APERIÓDICA DEL  
NIVEL DEL MAR DE ORIGEN METEOROLÓGICO EN LA ESCALA  
SINÓPTICA DE FRECUENCIAS EN AGUAS DEL ARCHIPIÉLAGO CUBANO**

### **CAPÍTULO 3. VARIABILIDAD DE LA COMPONENTE APERIÓDICA DEL NIVEL DEL MAR DE ORIGEN METEOROLÓGICO EN LA ESCALA SINÓPTICA DE FRECUENCIAS EN AGUAS DEL ARCHIPIÉLAGO CUBANO**

El presente capítulo tiene como objetivo caracterizar la variabilidad de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico en la escala sinóptica de frecuencias, mediante métodos estadísticos y espectrales.

3.1. Principales características estadísticas de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico en la escala sinóptica de frecuencias.

Los valores máximos anuales más altos de la CA-NM ocurrieron en Siboney, La Coloma y La Isabela; y sus valores mínimos anuales más bajos en Manzanillo, Santa Cruz del Sur, La Coloma, La Isabela y Casilda (Figura 3.1.1 y 3.1.2). Los máximos mensuales más importantes ocurrieron en Siboney, La Coloma, Santa Cruz del Sur, La Isabela, Casilda y Batabanó, casi todos entre noviembre y marzo. Los mínimos mensuales más importantes ocurrieron en Manzanillo, Santa Cruz del Sur, La Coloma y Batabanó entre noviembre y marzo principalmente (Figuras 3.1.3 y 3.1.4).

Los máximos y mínimos anuales y mensuales de la CA-NM fluctuaron entre 35-40 cm y 25-30 cm respectivamente. En Siboney y en las estaciones ubicadas en sectores costeros con amplias zonas de plataforma, se observaron las mayores diferencias entre mínimos y máximos mensuales y anuales, como en La Isabela, Casilda y La Coloma. La mayor parte

de los máximos anuales y mensuales más elevados tuvieron lugar en Siboney (Figura 3.1.2) y los mínimos en Manzanillo (Figura 3.1.1).

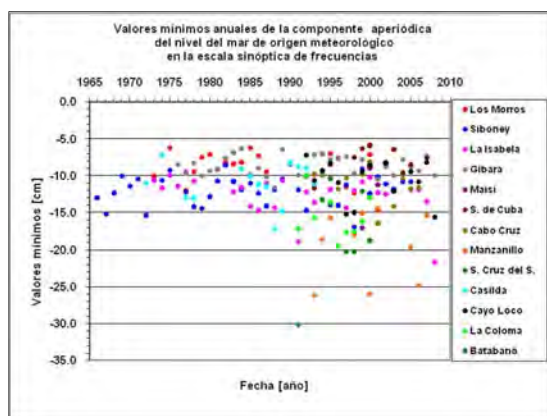


Figura 3.1.1. Valores mínimos anuales de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico.

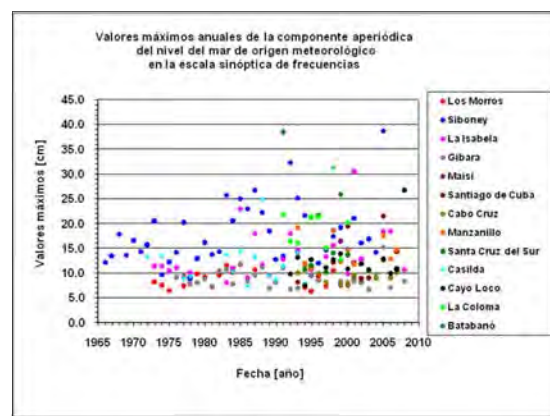


Figura 3.1.2. Valores máximos anuales de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico.

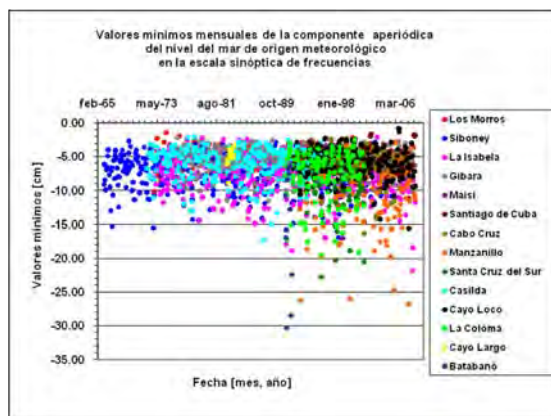


Figura 3.1.3. Valores mínimos mensuales de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico.

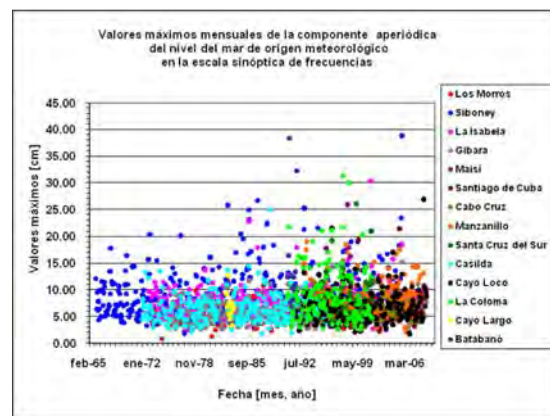


Figura 3.1.4. Valores máximos mensuales de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico.

En general, se observó una tendencia al aumento de los valores máximos mensuales y anuales desde inicios de los años 80 del siglo XX, y del valor absoluto de los mínimos mensuales y anuales desde inicios de los 90, en localidades interiores de la plataforma insular y en Siboney.

La intensidad anual de la CA-NM resultó mayor en Siboney y en localidades interiores de las plataformas suroccidental y suroriental, como La Isabela, Manzanillo, Batabanó, La Coloma y Santa Cruz del Sur, con fluctuaciones interanuales de 10 a 30 cm<sup>2</sup> en la mayoría de las mismas (Figura 3.1.5). Los estimados más bajos de la intensidad anual de la CA-NM se obtuvieron para Los Morros y Gibara.

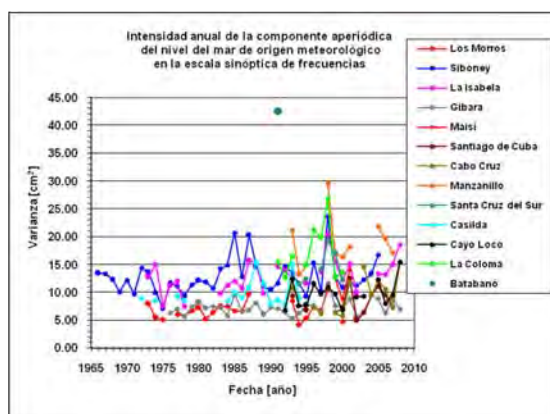


Figura 3.1.5. Intensidad anual de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico.

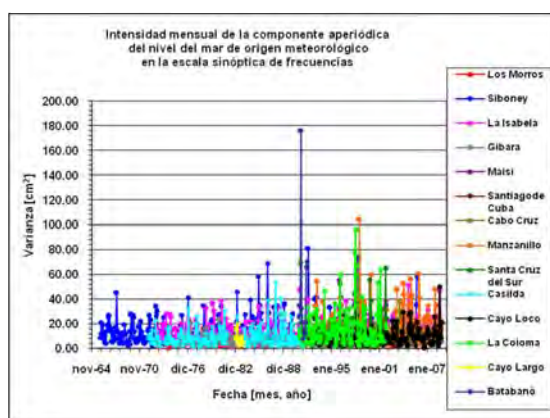


Figura 3.1.6. Intensidad mensual de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico.

La intensidad mensual de las variaciones de la CA-NM alcanzó sus máximos valores en Manzanillo, La Coloma y Siboney (Figura 3.1.6). Se observó un ciclo de aumento de la intensidad mensual desde inicios de los años 80 en La Coloma, Manzanillo y Siboney, principalmente. Sobresalió la elevada intensidad anual de las variaciones de la CA-NM en Batabanó, cuyo valor mensual más elevado se obtuvo en el mes de marzo (Figuras 3.1.7), bajo la influencia de cuatro frentes fríos clásicos, tres de ellos moderados, que fueron antecedidos por fuertes vientos de componente sur (Figura 3.1.8). En esta localidad, las variaciones de la CA-NM fueron más intensas en 1991 que en La Coloma en más de un 50% de la varianza, también localizada en el interior de la plataforma pero más próxima a las aguas oceánicas. Puede suponerse que la intensidad de las variaciones de la CA-NM debe ser mayor en Batabanó que en otras localidades, debido a la gran magnitud de los valores estimados a partir del único registro de 1991 en esta localidad.

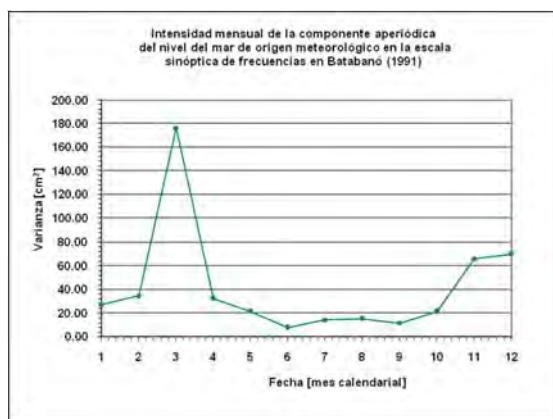


Figura 3.1.7. Intensidad mensual de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico en Batabanó, en 1991.

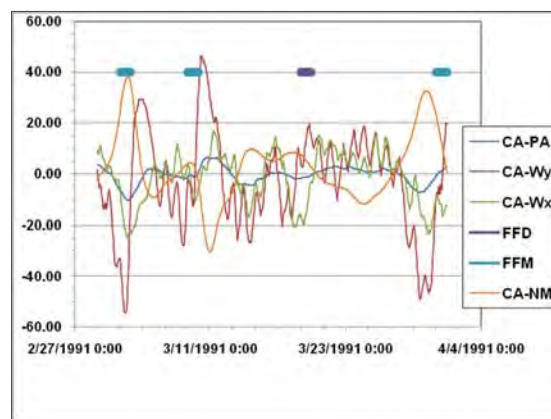


Figura 3.1.8. Variaciones de los parámetros meteorológicos y frentes fríos durante marzo de 1991 en Batabanó.

El valor máximo anual extremo de la CA-NM de Siboney ocurrió en el 2005, debido al paso del huracán Wilma por las aguas oceánicas adyacentes. El valor máximo mensual extremo de la intensidad de la CA-NM ocurrió en febrero de 1992, mes en que pasó la intensa baja extratropical del día 6 (Figuras 3.1.9 y 3.1.10). La intensidad de las variaciones de la CA-NM fue, como promedio, más elevada durante los meses del primer y cuarto trimestre del ciclo anual. La misma alcanzó sus valores más elevados en localidades interiores de la plataforma insular, como La Coloma y Manzanillo en marzo, y Santa Cruz del Sur en noviembre (Figura 3.1.11).

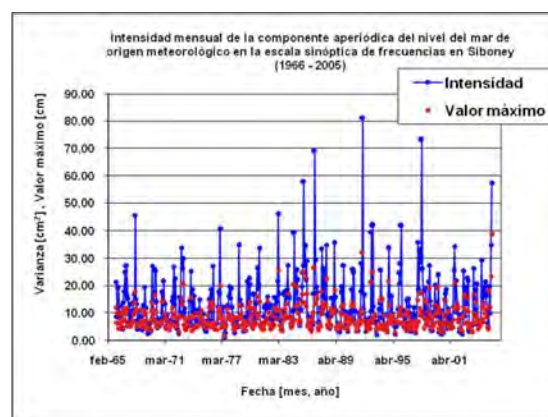
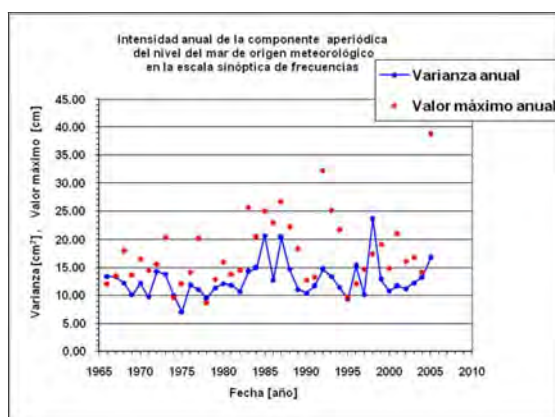


Figura 3.1.9. Intensidad y máximos anuales de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico en Siboney.

Figura 3.1.10. Intensidad mensual de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico en Siboney.

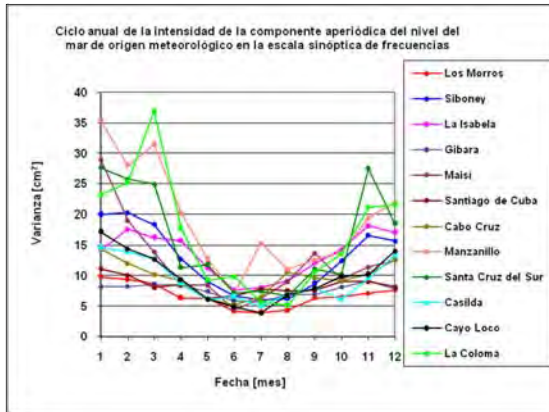
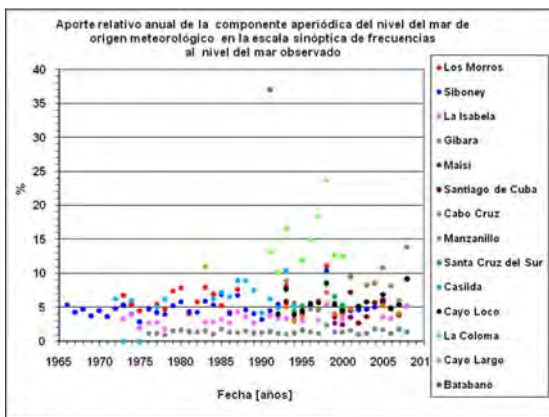
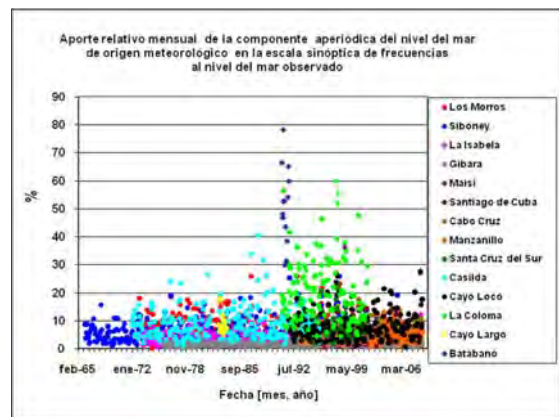


Figura 3.1.11. Ciclo anual de la intensidad de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico.

El AR anual (Figura 3.1.12) y mensual (Figura 3.1.13) alcanzaron sus valores máximos en la plataforma suroccidental (Batabanó y La Coloma). En esta zona la CA-NM representó un porcentaje mayor del NMO que en otras zonas de las aguas cubanas. Los valores más bajos de AR se obtuvieron para Gibara y La Isabela.



a



b

Figura 3.1.12. Aporte relativo anual (a) y mensual (b) de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico al nivel del mar observado.



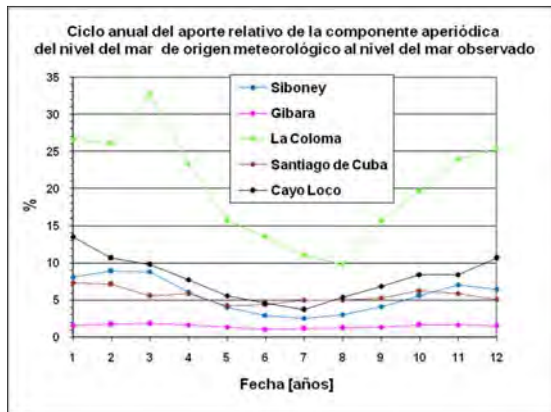


Figura 3.1.13. Ciclo anual medio del aporte relativo de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico.

Anualmente, las variaciones de la CA-NM representaron un porcentaje mayor de las variaciones del NMO en La Coloma y Batabanó (Figura 3.1.12, a); mientras que mensualmente la CA-NM representó un mayor por ciento del NMO en La Coloma, Batabanó y Casilda (Figura 3.1.12, b). Al igual que el ciclo anual de la intensidad de las variaciones de la CA-NM, el ciclo anual del AR alcanzó sus máximos valores en el primer y cuarto trimestre, principalmente en La Coloma. El AR varió ampliamente en la plataforma suroccidental, desde más del 30% en marzo hasta un 10% en agosto (Figura 3.1.13).

3.2. Principales características estadísticas de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico en la escala sinóptica de frecuencias de los semestres diciembre – mayo y junio – noviembre.

La intensidad promedio de la CA-NM para el semestre diciembre – mayo aumentó entre inicios de los años 80 y finales de los 90, con fuertes fluctuaciones entre los intervalos semestrales; y alcanzó valores elevados en La Coloma, Siboney, Manzanillo y Santa Cruz

del Sur y más bajos en Los Morros, Gibara y Santiago de Cuba (Figura 3.2.1). Los máximos y mínimos experimentaron amplias fluctuaciones en La Coloma, Siboney, La Isabela, Santa Cruz del Sur y Manzanillo, ocurriendo las variaciones extremas más importantes en las zonas interiores de la plataforma y en Siboney (Figuras 3.2.2, a y b).

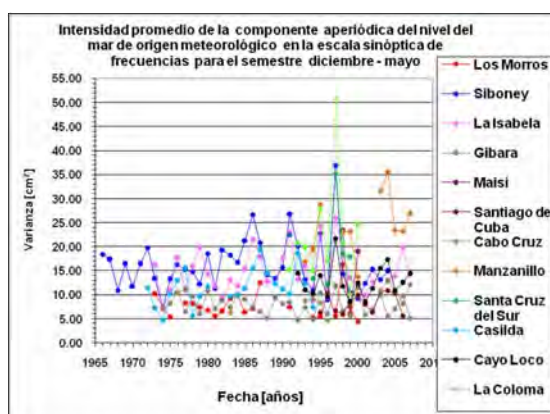
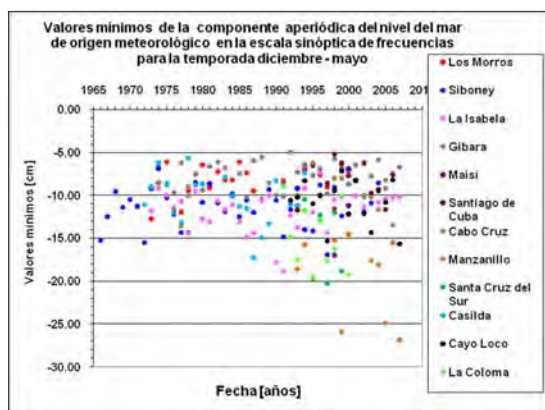
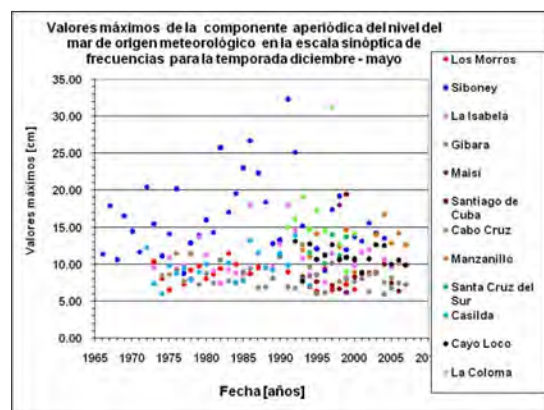


Figura 3.2.1. Intensidad promedio para el semestre diciembre – mayo.



a



b

Figura 3.2.2. Valores mínimos (a) y máximos (b) de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico para el semestre diciembre – mayo.

La intensidad promedio de la CA-NM para el semestre junio – noviembre aumentó ligeramente desde mediados de los años 90 hasta el 2005, apreciándose fluctuaciones moderadas de un intervalo semestral a otro; con excepción de Manzanillo, Siboney, La Isabela, Cabo Cruz, Santa Cruz del Sur y La Coloma, donde ocurrieron fuertes fluctuaciones de la intensidad entre 1998 y el 2005. En 1998 se obtuvo la estimación más alta de la intensidad en Manzanillo; y las más bajas se obtuvieron en Los Morros, Gibara, Santiago de Cuba, Casilda y Cayo Loco (Figura 3.2.3).

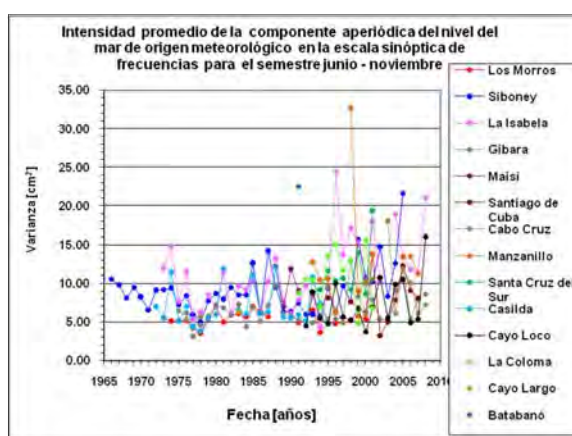
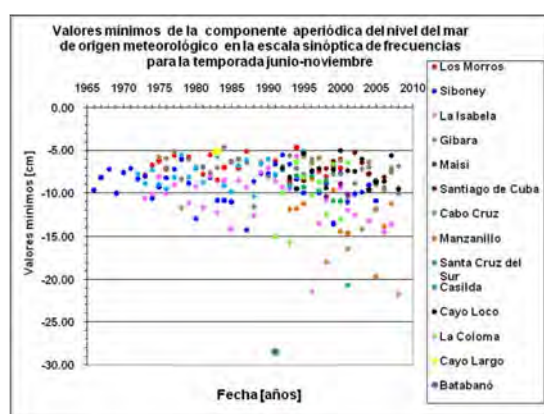


Figura 3.2.3. Intensidad promedio de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico para el semestre junio – noviembre.



a



b

Figura 3.2.4. Valores mínimos (a) y máximos (b) anuales de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico para el semestre junio – noviembre.

La amplitud entre máximos y mínimos fue en general menor que en el semestre diciembre – mayo (Figuras 3.2.4, a y b). El valor de los máximos y el valor absoluto de los mínimos en localidades interiores de la plataforma y en Siboney tendieron a aumentar.

La intensidad promedio de la CA-NM alcanzó mayores valores en las regiones occidental y central durante el semestre diciembre-mayo que durante el semestre junio-noviembre (temporada ciclónica), y sus fluctuaciones más amplias se produjeron en localidades de zonas de plataforma amplia y en Siboney (Figura 3.2.5, a). En la región oriental de Cuba (Figura 3.2.5, b), la intensidad anual de las variaciones de la CA-NM en general resultó menor que en las regiones occidental y central, con predominio de la intensidad promedio de la CA-NM durante el semestre diciembre – mayo.

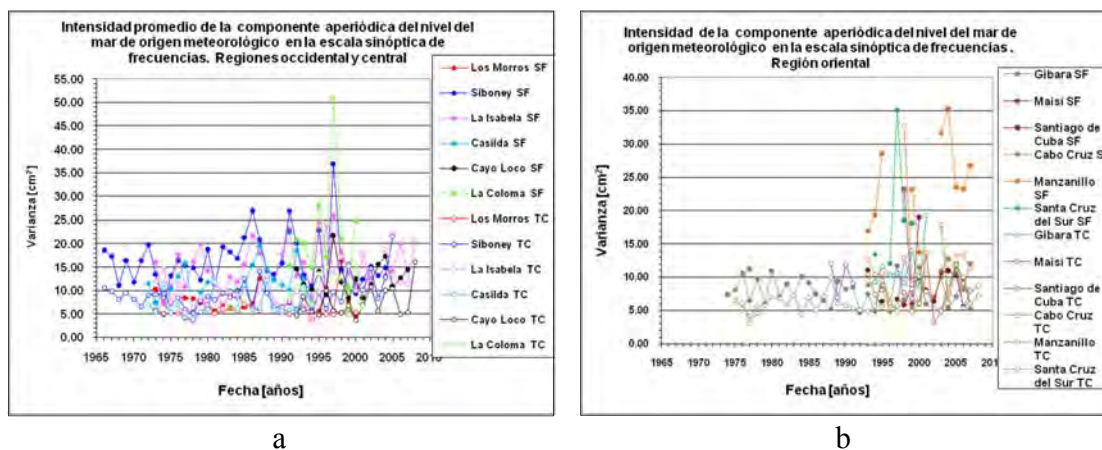


Figura 3.2.5. Intensidad promedio de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico en las regiones occidental y central (a), y en la región oriental (b).

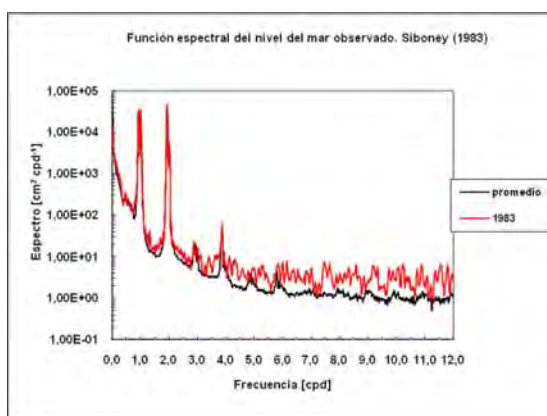
La intensidad promedio de la CA-NM aumentó en localidades interiores de las plataformas suroccidental y suroriental, desde mediados de los años 90.

3.3. Estructura espectral del nivel del mar observado y de su componente aperiódica de origen meteorológico en la escala sinóptica de frecuencias.

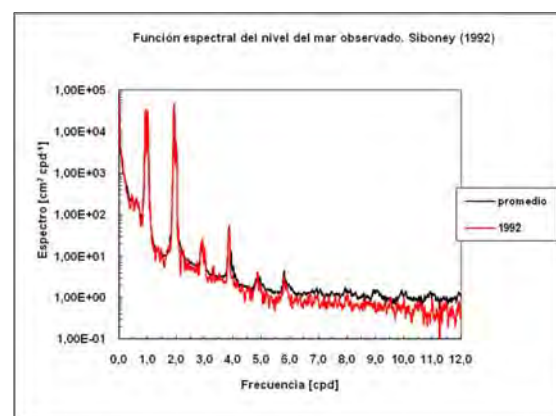
La estructura espectral del nivel del mar representa la distribución de energía por frecuencias de sus diferentes componentes y caracteriza la intensidad promedio con que éstas ocurren.

3.3.1. Estructura espectral anual del nivel del mar observado.

En la FE anual del NMO (Figura 3.3.1 a, b, c y d), sobresalieron los máximos espectrales de las oscilaciones diurnas y semidiurnas de la marea y de sus derivadas sobre un fondo de ruido aleatorio. En algunos casos, la energía del fondo de ruido aleatorio fue mayor que el promedio, debido a una mayor influencia meteorológica, como en 1983 (Figura 3.3.1. a).



a



b

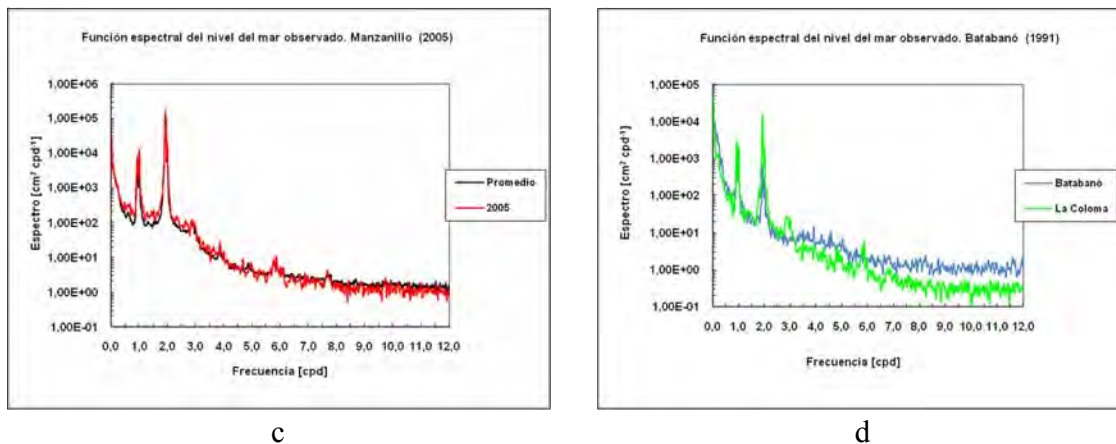


Figura 3.3.1. Función espectral del nivel del mar observado en diferentes zonas del archipiélago cubano.

En algunos casos, el ruido aleatorio anual fue mayor que el promedio en las frecuencias medias y altas, debido a una mayor influencia de los factores meteorológicos (Figura 3.3.1, a). En 1991, en Batabanó también se produjo ruido aleatorio en las frecuencias medias y altas, de más intensidad que en la cercana localidad de La Coloma (Figura 3.3.1, c); lo que debió estar relacionado no sólo con la mayor influencia meteorológica, sino también con las condiciones de menor profundidad y de mayor internamiento de Batabanó en la amplia plataforma insular. En los años de más intensa actividad ciclónica, se observó un aumento de la energía aleatoria sobre el promedio anual hacia las bajas frecuencias  $f < 0,50$  cpd como en el 2005 (Figura 3.3.1d).

Los máximos espectrales correspondientes a las principales ondas semidiurnas (Anexo 2),  $M_2$  ( $T_0=12,42$  h) y  $S_2$  ( $T_0=12,00$  h), se ubicaron en los 1,93 ( $T=12,43$  h) y 2,00 ( $T=12,00$  h) ciclos por día (cpd) (Figura 3.3.1 a – d). Los máximos espectrales correspondientes a las

componentes diurnas  $O_1$  ( $T_0 = 25,82$  h) y  $K_1$  ( $T_0 = 23,93$  h), se ubicaron en las frecuencias de 0,94 ( $T=25,59$  h) y 1,01 ( $T=23,84$  h) cpd de los gráficos de la función espectral anual; observándose una buena correspondencia entre los resultados del análisis espectral aplicado (Figuras 3.3.1 a – d) y el análisis armónico. También se apreciaron señales espectrales de las componentes parciales de aguas someras (Anexo 2) en los 2,94-3,00 ( $T=8,17$ -7,98 h), 3,86 ( $T=6,21$  h), 4,88 ( $T=4,92$  h) y 5,80-5,86 ( $T=4,13$ -4,09 h) cpd, correspondientes a las componentes  $MK_3$ ,  $M_4$ ,  $2MK_5$ ,  $M_6$ . La función de autocorrelación (FA) anual del NMO (Figura 3.3.2 a y b), que corresponde a un proceso armónico sobre fondo de ruido aleatorio (Bendat y Piersol, 1986), mostró oscilaciones armónicas cada 12 horas, en correspondencia con el predominio energético de la marea (Guerman y Lévikov, 1988), y ésta en Siboney es semidiurna irregular (Rodríguez y Rodríguez, 1983).

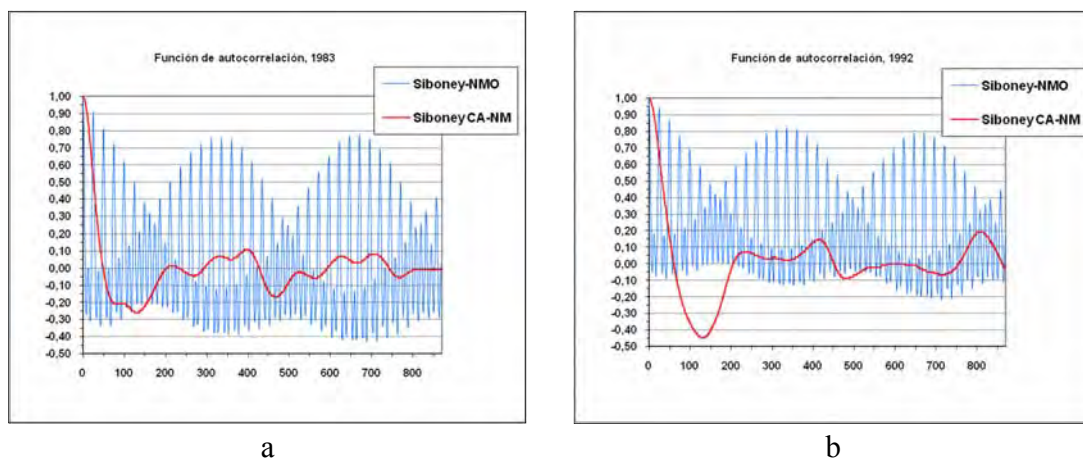


Figura 3.3.2. Función de autocorrelación anual del nivel del mar observado (a) y de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico (b).

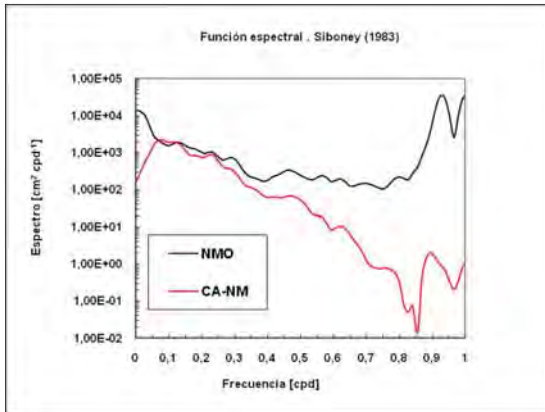
### 3.3.2 – Estructura espectral anual de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico en la escala sinóptica de frecuencias.

La función de autocorrelación de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico decae suavemente y tiende a cero (Figura 3.3.2, a y b), ya que corresponde a un proceso aleatorio estacionario (Bendat y Piersol, 1986).

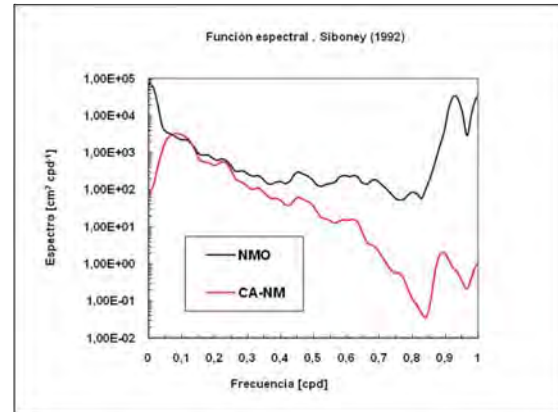
La energía de las variaciones de la CA-NM se distribuyó a lo largo de la banda analizada (0,07 – 1,00 cpd), notándose máximos espectrales y otras señales menos prominentes. Estos máximos, denominados también “máximos sinópticos” (Guerman y Levikov, 1988), señalan zonas del espectro energético donde se producen variaciones más intensas debido a una mayor influencia de las fuerzas generadoras de la CA-NM (Figuras 3.3.3, a y b). En los gráficos de la FE anual, el primer máximo espectral desde el origen de coordenadas es falso, ya que se debe al filtrado numérico, por lo que no representa un máximo sinóptico de energía (Guerman y Levikov, 1988). La estructura espectral de la CA-NM en las localidades estudiadas es similar entre los 0,07 y los 0,70 cpd, a pesar de las diferencias físico – geográficas de las mismas.

En las localidades de las costas norte y sur, aparecieron máximos espectrales bien definidos entre los 0,22 y 0,24 cpd ( $T=108,8$  h; 4,5 d) y entre los 0,38 y los 0,78 cpd ( $T=2,9 - 1,3$  días) (Figuras 3.3.4, a - f). Los máximos de los 0,22 cpd ( $T=4,5$  d) aparecieron con más frecuencia que los demás en todas las FE anuales obtenidas, lo que indica un predominio de las variaciones de la CA-NM con períodos cercanos a los 4,5 días.



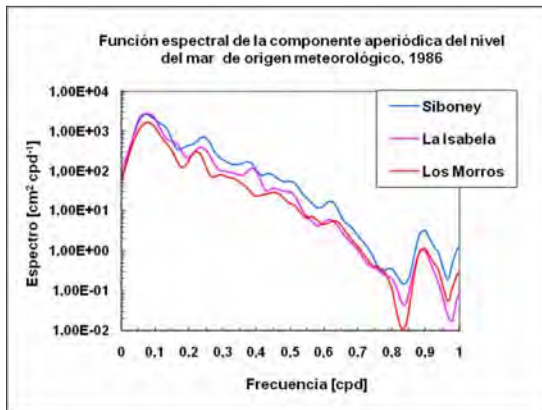


a

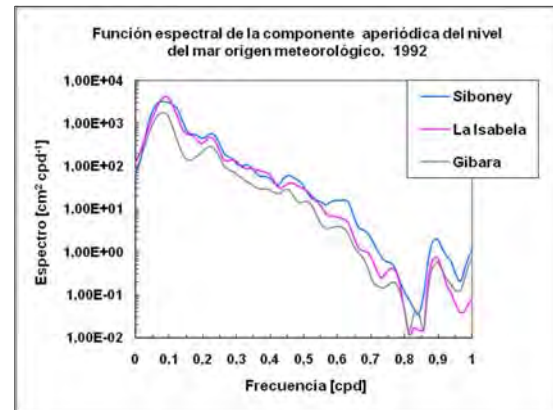


b

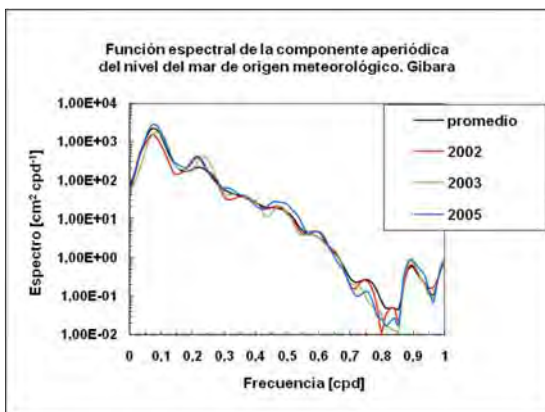
Figura 3.3.3. Función de autocorrelación anual del nivel del mar observado (NMO) y de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico (CA-NM).



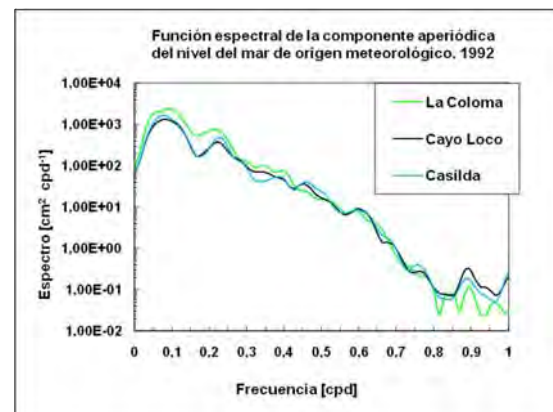
a



b



c



d

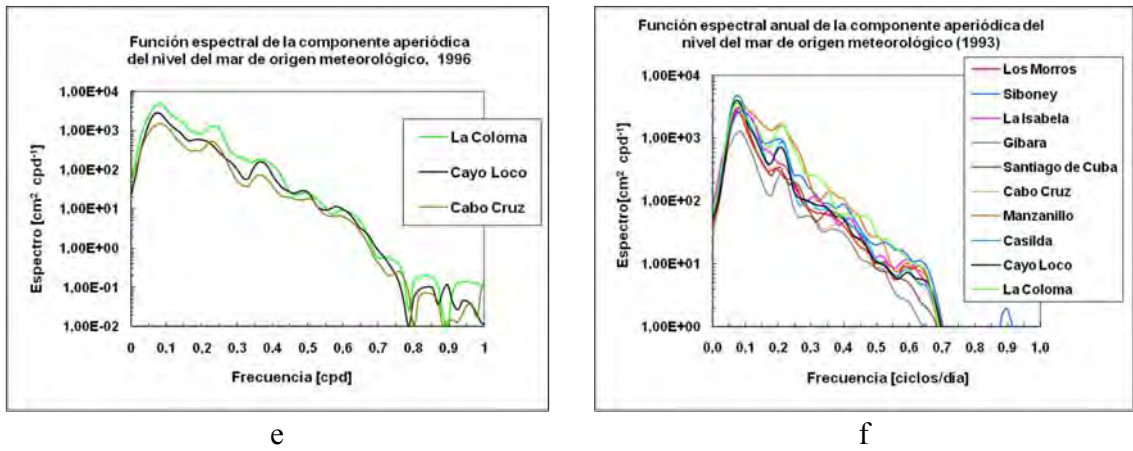


Figura 3.3.4. Estructura espectral de las variaciones de la CA-NM de diferentes localidades de las costas norte y sur del archipiélago cubano.

La FE anual de Batabanó en 1991 mostró señales espectrales distribuidas en un amplio intervalo de frecuencias: 0,17 - 0,87 cpd (Figura 3.3.5), en correspondencia con la naturaleza predominantemente aperiódica de origen meteorológico de las variaciones del nivel del mar en esa localidad (Figura 3.3.6). En la FE anual de 1983 en Cayo Largo (Figura 3.3.5), aparecieron leves señales espectrales en los 0,22, 0,31 y 0,52 cpd. Por el momento, la menor disponibilidad de datos en Batabanó sólo permite suponer que las variaciones de la CA-NM pudieran ocurrir con mayor intensidad promedio que en La Coloma.

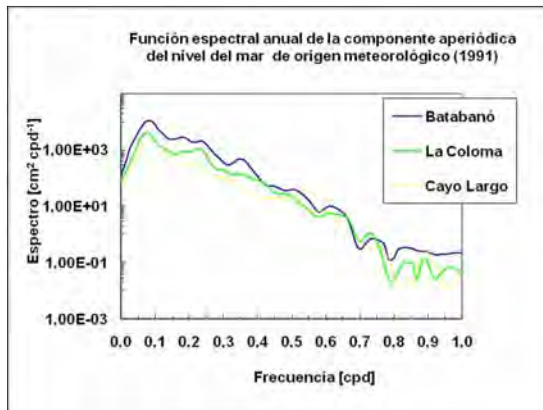


Figura 3.3.5. Estructura espectral de las variaciones de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico en la plataforma suroccidental.

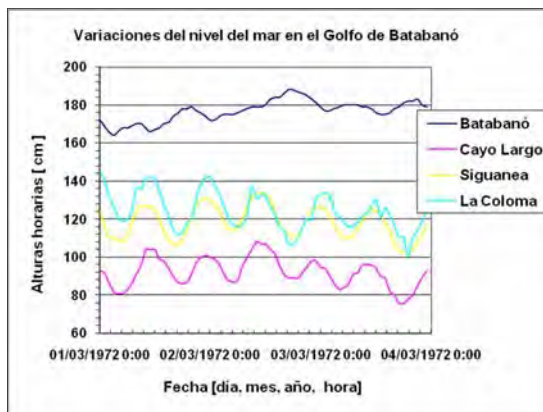


Figura 3.3.6. Variaciones del nivel del mar observado en la plataforma suroccidental (no referidas al cero geodésico).

Según otras investigaciones en los espectros se observan débiles máximos correspondientes a períodos de 3 hasta 10 días relacionados con el período sinóptico que caracteriza el período de recurrencia de los eventos sinópticos que perturban el campo bórico (Efimov, 1985). El citado autor afirma que se ha podido establecer que dichos máximos poseen un carácter inestable en tiempo y espacio y muchas veces se encuentran débilmente reflejados en los espectros energéticos. Sin embargo, el máximo de 0,22 cpd presente con buena definición en casi todas las FE anuales de la CA-NM obtenidas en el presente trabajo muestra que existe un patrón estable de las variaciones de la CA-NM para esa frecuencia en la región de estudio.

En la mayor parte de las FE anuales de las costas norte y sur, se destacó un pequeño pero definido máximo espectral en los 0,90 cpd ( $T=1,1$  días), que resultó más evidente en las localidades de la costa norte cercanas a las aguas oceánicas profundas, como Siboney, Los Morros y Gibara (Figura 3.3.4, a, b, c y f). En la costa sur resultaron menos visibles dichos máximos (Figura 3.3.4, d, e y f).

En todos los espectros promedio obtenidos a partir de todos los datos disponibles (Figura 3.3.7), se observaron leves señales espectrales alrededor de los 0,20 y los 0,60 cpd ( $T=4,8$  y 1,7 d); lo que indica que en la mayor parte de las FE anuales aparecieron máximos espectrales en esas frecuencias, a pesar del efecto suavizador de la promediación. Se destacaron los máximos de los 0,90 cpd, con excepción de algunas localidades de la costa sur, como Santa Cruz del Sur y La Coloma (Figura 2.3.1).

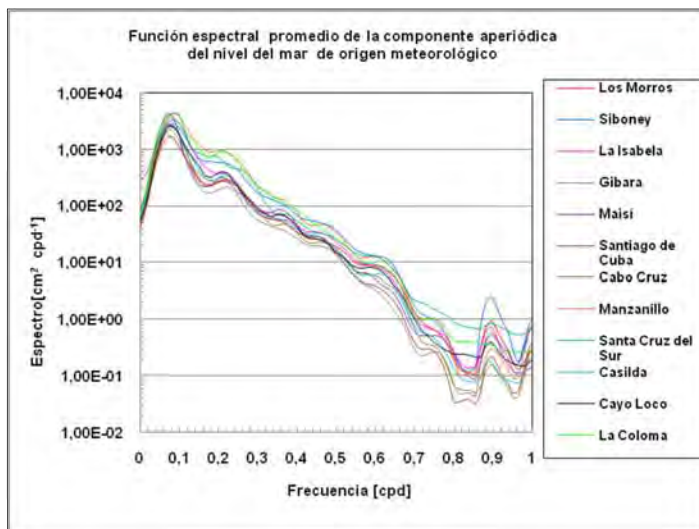


Figura 3.3.7. Función espectral promedio de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico en diferentes localidades del archipiélago cubano.

Las variaciones de la CA-NM ocurrieron en general con mayor intensidad promedio anual en las zonas interiores de la plataforma insular, como Batabanó, La Coloma, Santa Cruz del Sur y Manzanillo (Figura 2.3.1), que en las localidades cercanas al límite oceánico de la misma (Figura 3.3.8 y 3.3.9).

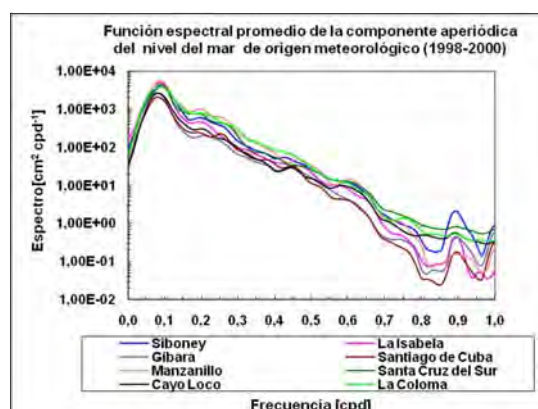
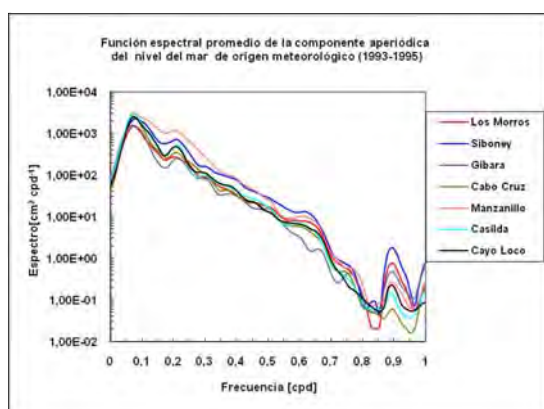


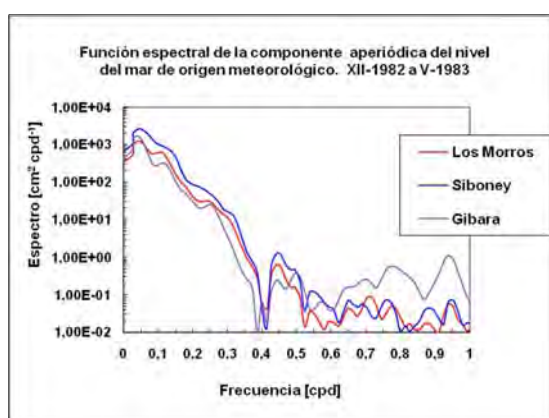
Figura 3.3.8. Estructura espectral promedio entre 1993 y 1995.

Figura 3.3.9. Estructura espectral promedio entre 1998 y 2000.

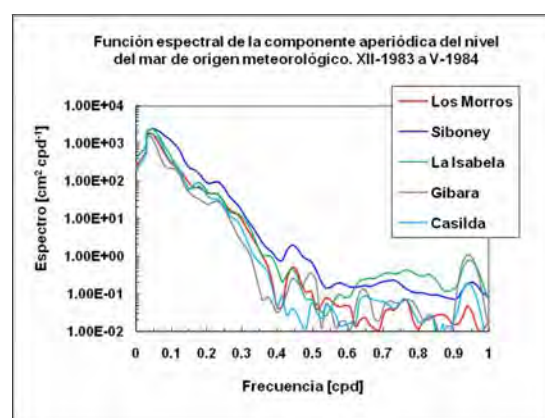
Las variaciones de la CA-NM del intervalo de frecuencias más bajas 0,07 – 0,50 fueron, como promedio, más intensas en las zonas interiores de la plataforma que en las localidades cercanas al límite oceánico. Por el contrario, las variaciones de la CA-NM ocurridas en el intervalo de frecuencias más altas (0,50 – 1,00 cpd) resultaron más intensas cerca del límite oceánico de la plataforma que en su interior (Figuras 3.3.8 y 3.3.9).

3.3.3. Estructura espectral de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico en la escala sinóptica de frecuencias de los semestres diciembre – mayo y junio – noviembre.

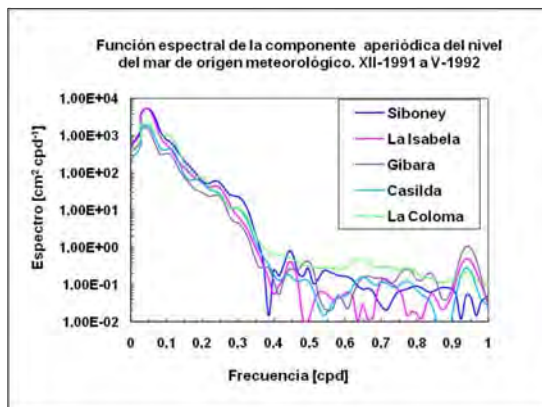
La estructura espectral de la CA-NM del semestre diciembre – mayo (Figuras 3.3.10, a – e) fue similar a la de junio – noviembre (Figuras 3.3.11, a - d), observándose una disminución de la energía espectral desde los 0,07 cpd hasta los 0,40 cpd ( $T=2,5$  d). En este intervalo se observaron máximos y señales espectrales en casi todas las localidades estudiadas, sobre todo alrededor de 0,12 cpd ( $T=8,3$  d), 0,20 cpd ( $T=5,0$  d) y en 0,30 cpd ( $T=0,3$  d).



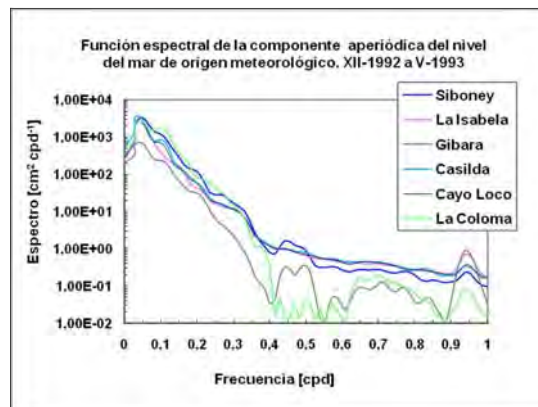
a



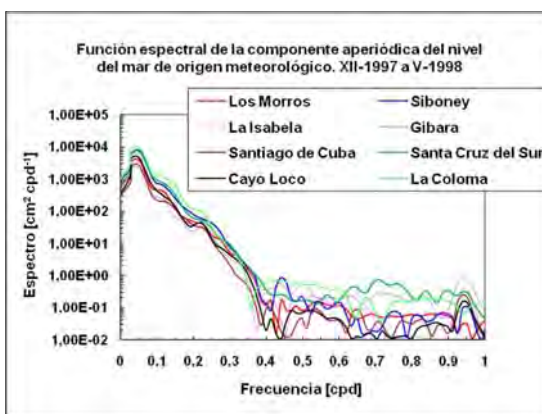
b



c



d



e

Figura 3.3.10. Estructura espectral de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico para el semestre diciembre – mayo.

Entre los 0,40 cpd y 1,00 cpd, la estructura espectral de las variaciones de la CA-NM se manifestó en general de dos formas:

- 1) La energía espectral disminuyó suavemente desde los 0,40 cpd hasta los 0,90 – 0,95 cpd ( $T = 1,1 - 1$  d), donde apareció un máximo espectral. Esta estructura es más común en la costa sur (La Coloma y Cayo Loco) que en la norte (Los Morros y Siboney). En algunas FE aparecieron máximos espectrales bien definidos en el intervalo 0,4 - 0,5 cpd ( $T = 2,5 - 2,0$  d), sobre todo en las localidades de la costa norte.

2) Se observó una estructura espectral irregular con máximos espectrales notablemente más estables en el intervalo 0,4 - 0,5 cpd ( $T= 2,5 - 2,0$  d), sobre todo en las localidades de la costa norte y Santiago de Cuba. Se observó el máximo espectral de los 0,90 cpd.

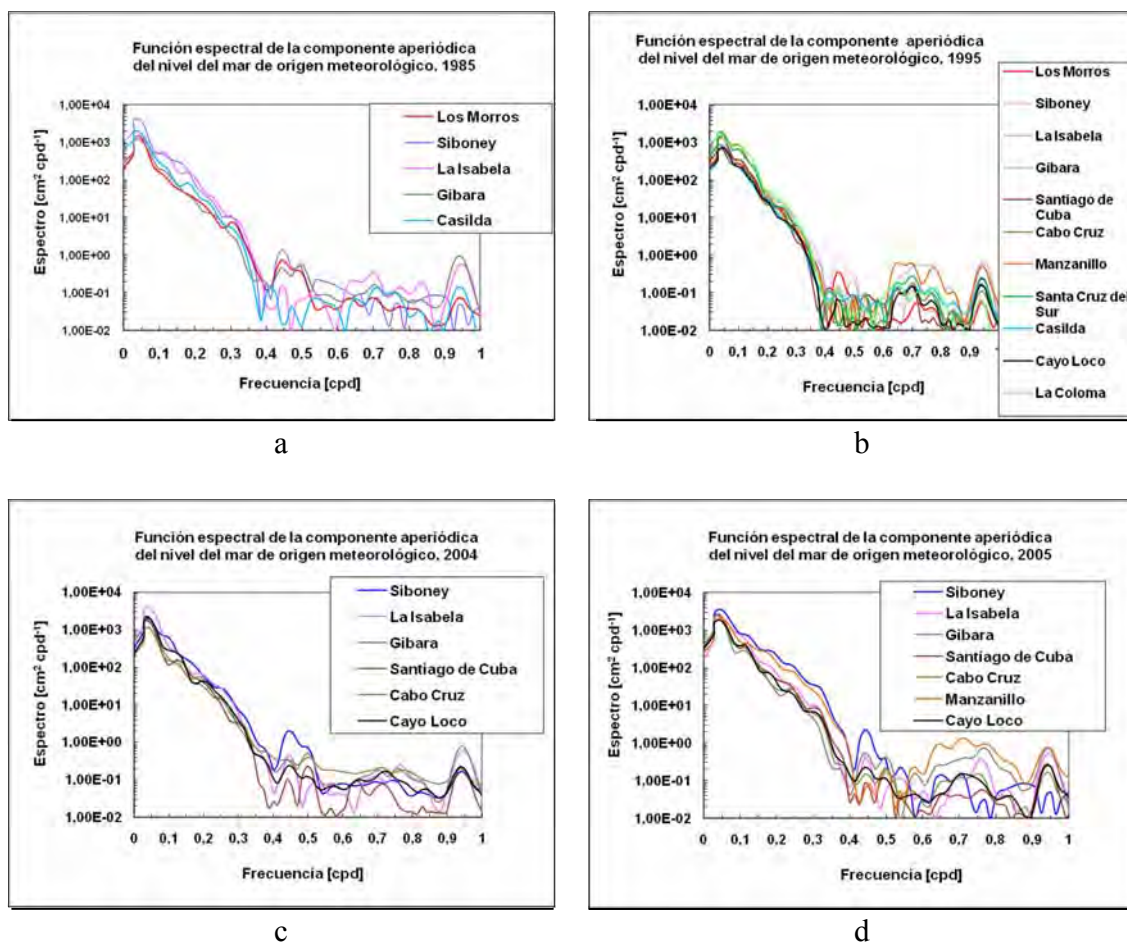


Figura 3.3.11. Estructura espectral de las variaciones de la componente aperiódica del nivel del mar de origen meteorológico para el semestre junio – noviembre.



Para ambos semestres del ciclo anual predominaron, por su energía, las variaciones de la CA-NM con períodos de 1,1, 2,0 a 2,5 y de 3,0 a 4,5 días; mientras que ocurrieron en menor medida las variaciones con períodos de aproximadamente 7 - 8 días.

Como pudo apreciarse, la estructura espectral de las variaciones de la CA-NM en ambos semestres fue semejante, aunque se diferenciaron por la magnitud de su energía espectral promedio.

Para el intervalo de frecuencias más bajas,  $0,07 - 0,40$  cpd ( $T = 2,5 - 15$  días), las variaciones de la CA-NM ocurrieron, como promedio, con mayor intensidad en el semestre diciembre – mayo que en el semestre junio – noviembre; observándose la mayor diferencia entre ambos semestres en Siboney (Figura 3.3.12) y la menor en Manzanillo (Figura 3.3.13).

Para el intervalo de frecuencias más altas,  $0,40 - 1,00$  cpd ( $T = 2,5 - 1$  día), las variaciones de la CA-NM ocurrieron, como promedio, con mayor intensidad entre junio y noviembre.

Es decir, durante la temporada ciclónica las variaciones de la CA-NM de períodos más cortos alcanzaron, como promedio anual, mayor energía que las de períodos más largos. En cambio, durante los meses de mayor influencia de los sistemas frontales, las variaciones de períodos más largos se caracterizaron por una mayor energía que las de períodos más cortos en casi todas las localidades analizadas.

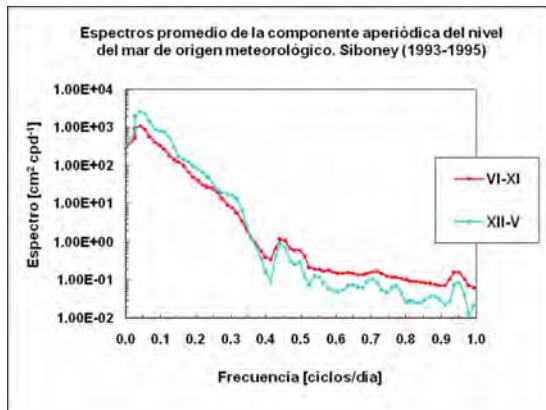


Figura 3.3.12. Estructura espectral promedio de la CA-NM para dos semestres opuestos del ciclo anual, en el sector noroccidental.



Figura 3.3.13. Estructura espectral promedio de la CA-NM para dos semestres opuestos del ciclo anual, en la plataforma suroriental.

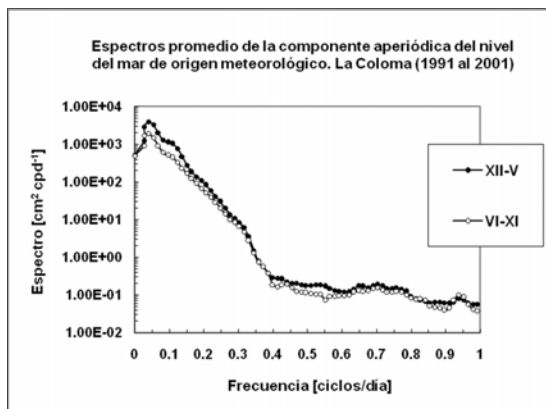


Figura 3.3.14. Estructura espectral en la plataforma suroccidental durante los semestres diciembre – mayo y junio – noviembre.

Excepcionalmente, en La Coloma la energía espectral promedio de la CA-NM del semestre diciembre - mayo fue mayor que la energía de la CA-NM de la temporada ciclónica, en casi toda la banda de frecuencias analizada (Figura 3.4.14). Esto significa que en esta

localidad, y probablemente en la mitad occidental del Golfo de Batabanó, las variaciones de la CA-NM fueron más intensas entre diciembre y mayo que entre junio y noviembre, de 1991 al 2001.

En la estructura espectral, ocurrieron cambios interanuales relacionados principalmente con la ubicación de los máximos espectrales y la amplitud de los mismos, lo que se debió al comportamiento diferente de los eventos sinópticos de un año a otro. Puede suponerse, entonces, que la estructura espectral podría cambiar a largo plazo debido a cambios del patrón de los eventos sinópticos. En este sentido, se calcularon espectros promedio para una media móvil de orden  $n = 18$  años, con el registro de datos de mayor longitud de Siboney (Tabla 2.3.1), con el propósito de conocer si se estaban produciendo cambios de la estructura espectral con alguna tendencia. Como resultado, la similitud entre los espectros promedio no evidenció cambios en la estructura espectral de la CA-NM durante un período de 40 años en Siboney (Figura 3.3.15).

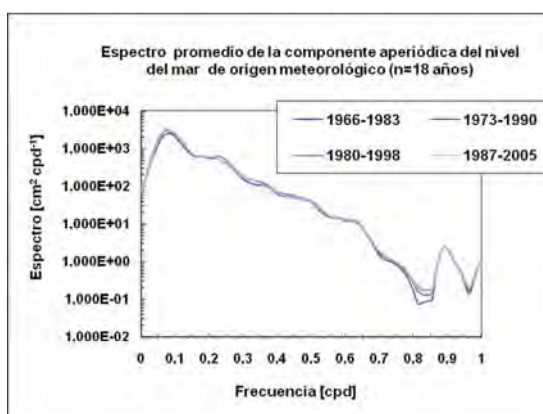
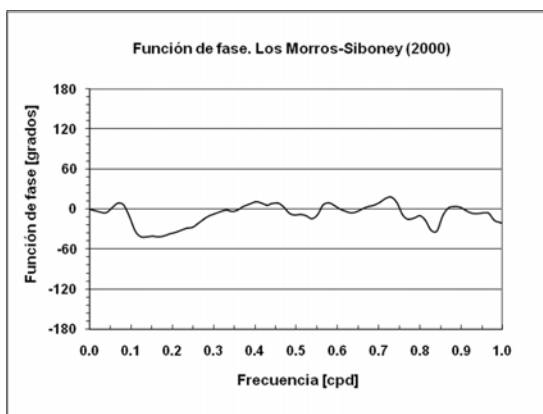


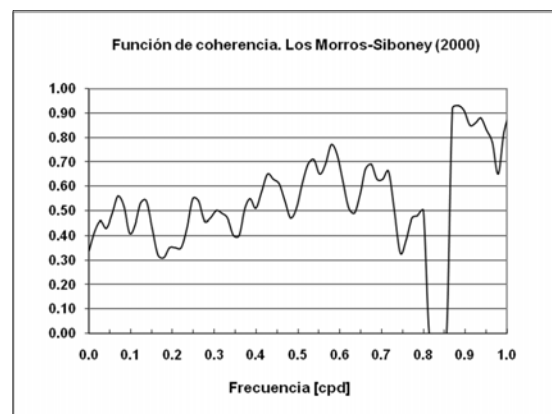
Figura 3.3.15. Estructura espectral promedio a largo plazo.

### 3.4. Propagación de las variaciones aperiódicas del nivel del mar de origen meteorológico en la escala sinóptica de frecuencias en el archipiélago cubano.

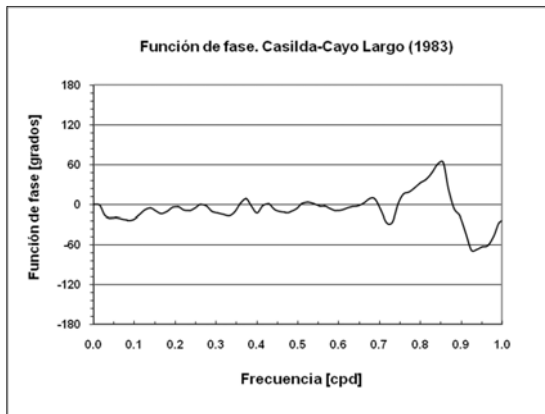
En las costas norte y sur, las variaciones de la CA-NM ocurrieron con pequeñas diferencias de fase para 0,20 - 0,70 cpd ( $T= 4,8 - 1,4$  días) entre localidades cercanas y lejanas, con diferentes condiciones geográficas e hidrográficas (Figura 3.4.1, a - h) con valores de coherencia de 0,70 a 0,90. La propagación de las variaciones de la CA-NM a lo largo de las costas norte y sur del archipiélago y su elevada coherencia dependió del comportamiento de los eventos sinópticos durante los períodos anuales analizados, ya que el área de influencia de éstos puede extenderse por más de 1000 km (IOC, 1990). Ésta debió estar relacionada también con la propagación de ondas atrapadas a la costa (Ramírez y Hernández, 2006) que, si bien se originan por eventos sinópticos (Ramírez, 1991), deben su propagación al efecto de atrapamiento que ejerce la costa (Efimov, 1985).



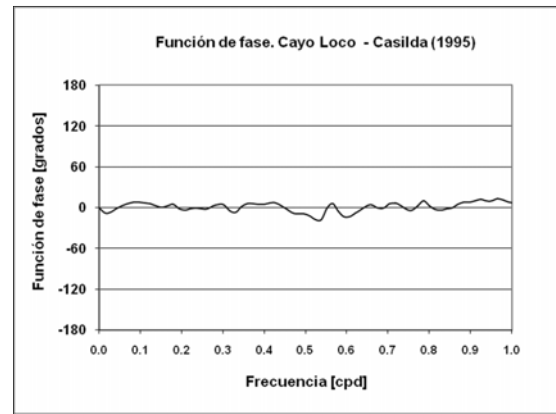
a



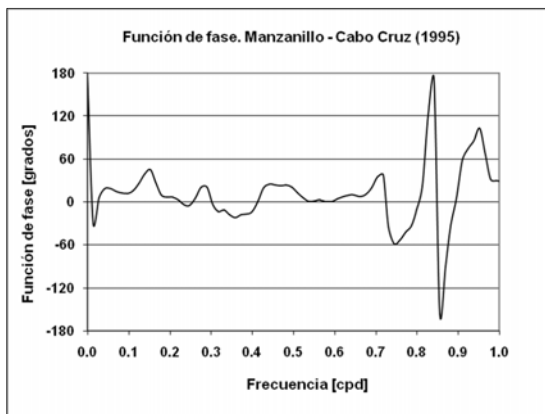
b



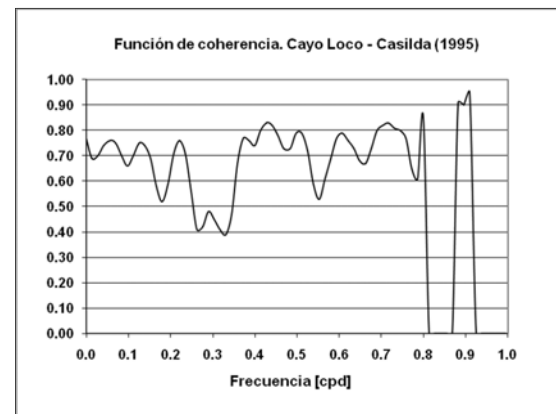
c



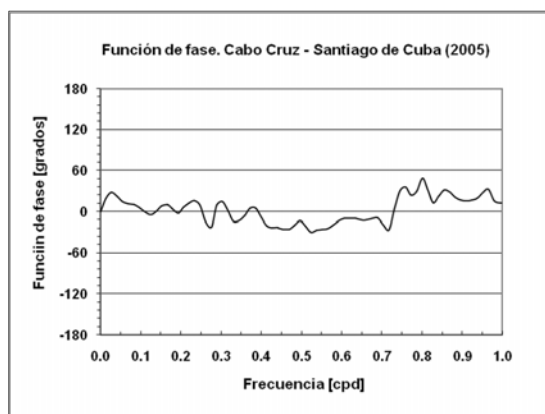
d



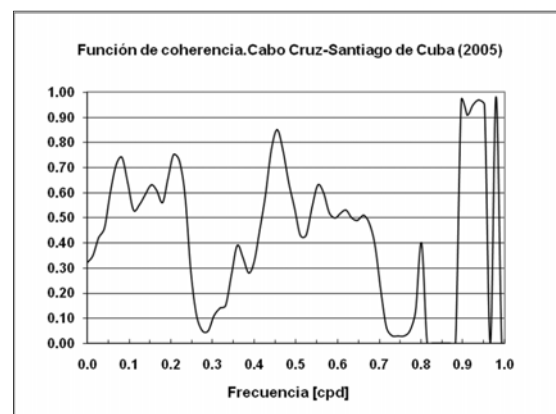
e



f



g



h

Figura 3.4.1. Diferencia de fase y coherencia de las variaciones aperiódicas del nivel del mar de origen meteorológico entre diferentes localidades de las costas norte y sur.

Se puede concluir que la estructura espectral de la CA-NM en las localidades estudiadas es similar entre los 0,07 y los 0,70 cpd, a pesar de las diferentes condiciones físico-geográficas, con sus principales máximos espectrales en 0,22 y 0,90 cpd. Los valores extremos más importantes y las variaciones más intensas de la CA-NM ocurrieron en zonas interiores de la plataforma insular, principalmente en la suroccidental, y en Siboney, para un amplio intervalo de la banda de frecuencias analizada. La CA-NM mostró más energía promedio 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. En aguas cubanas predominan las variaciones coherentes de la CA-NM.