

“Metodología radárica para el diagnóstico y pronóstico del oleaje en el litoral habanero”.

Autor: M. Sc. Claudio A. Sánchez Pedroso, M. Sc. Griselda Makinstoch Rodríguez

Introducción.

Es conocido que la costa Norte de la región occidental y en especial las provincias Habaneras, con frecuencia experimentan afectaciones por fenómenos meteorológicos de carácter marítimo como es el oleaje que en dependencia de sus características poseen capacidad potencial de producir inundaciones costeras por penetraciones del mar.

Los fenómenos meteorológicos que se vinculan con lo antes expuesto son Los ciclones tropicales, las bajas extratropicales y los sistemas frontales. La afectación por estos últimos, habitualmente la ocasiona la prolongación del frente frío hacia la periferia de las bajas extratropicales, las cuales generalmente se desplazan hacia el Este por encima de los 30 grados de latitud Norte, con menos frecuencia ocurre que la porción central de éstas se aproxima hacia latitudes más bajas que la referida anteriormente, identificándose entonces de manera notable la acción del frente frío asociado, sobre el territorio Nacional con fuertes vientos, oleaje extremos y consecuentemente las inundaciones costeras por penetraciones del mar.

Para distinguir ambas situaciones meteorológicas, cuando sólo se experimenta la influencia de la periferia de la baja, se suele hablar de la afectación del "frente frío". Ahora bien sí resulta que el centro de la baja se encuentra más cerca, entonces la afectación se le adjudica a la "baja extratropical".

El 18 de Enero de 1977, en horas de la noche se inició un proceso de inundaciones costeras por penetraciones del mar en la costa Norte de las provincias Habaneras, extendiéndose hasta el día 19. Este hecho ocurrió por el tránsito de un frente frío clasificado de fuerte, el cual llegó a la región occidental de Cuba, reforzando las condiciones invernales ya existentes.

Los vientos de región Noroeste con velocidad de 79 km/h (22 m/s), ocasionados por el fuerte gradiente del anticiclón continental de 1029 hPa, que avanzaba detrás

de la línea frontal, dieron lugar a que estructurará una zona generadora de oleaje en la mitad oriental del Golfo de México. A medida que el frente frío se desplazaba al Sudeste sobre el citado golfo, el área generadora de oleaje se fue incrementando para quedar limitada por la costa Norte de la región occidental de Cuba.

El fetch alcanzó un valor total de 1000 km, que al conjugarse con la persistencia por un período de 12 horas y la gran velocidad del viento en el área dieron lugar a que se originarán olas con altura de 4 a 6 m.

Los sistemas frontales del Golfo de México suelen acompañarse de fuertes vientos de región Sur ("Sures"), los cuales ocasionan inundaciones costeras por efecto del Wind set up en zonas baja de la costa Sur de las provincias occidentales. A los referidos sistemas se asocian también extensos patrones nubosos con abundante actividad convectiva que con alguna frecuencia se manifiesta de manera tal que alcanza la categoría de tormentas severas. Ahora bien inmediatamente después del paso de los frentes fríos se implantan vientos fuertes de región Norte que constituyen un factor importante en la ocurrencia de inundaciones costeras debido a la acción del Wave set up que incide en el litoral Noroccidental de Cuba y que es capaz de dar lugar a olas con altura de 4 a 8 m.

Los huracanes han originado con mayor frecuencias las máximas velocidades de vientos en nuestro País, generando olas de más de 10m de altura. La influencia de estos organismos, sobre el territorio cubano, disminuye sensiblemente de W-E. Sus trayectorias de afectación más comunes, presentan entradas por la costa Sur y salida por la Norte.

El mayor peligro de inundaciones por oleaje extremo se presenta en la costa noroccidental de Cuba y en particular en la zona costera correspondiente al malecón Habanero, donde tradicionalmente se registran las máximas inundaciones por Wave set up. (Mitrani et al. 1997).

Le sigue en importancia de este tipo de inundaciones, la zona Norte del extremo más oriental de Cuba, cuando queda sometida a la influencia de un régimen de vientos del NE, generados con cierta regularidad por la interacción de las zonas periféricas de un centro de bajas presiones que transita sobre el continente con el

sistema anticiclón oceánico en la zona Sur occidental del Atlántico Norte y ocasionalmente por huracanes.

A continuación se presenta una tabla donde se recogen diferentes situaciones sinópticas peligrosas en las que se produjeron fuertes marejadas e importantes inundaciones costeras por penetraciones del mar en el Malecón Habanero.

Tabla 1. Relación de situaciones sinópticas que dieron lugar a penetraciones del mar ocurridas desde 1975 hasta el 2000.

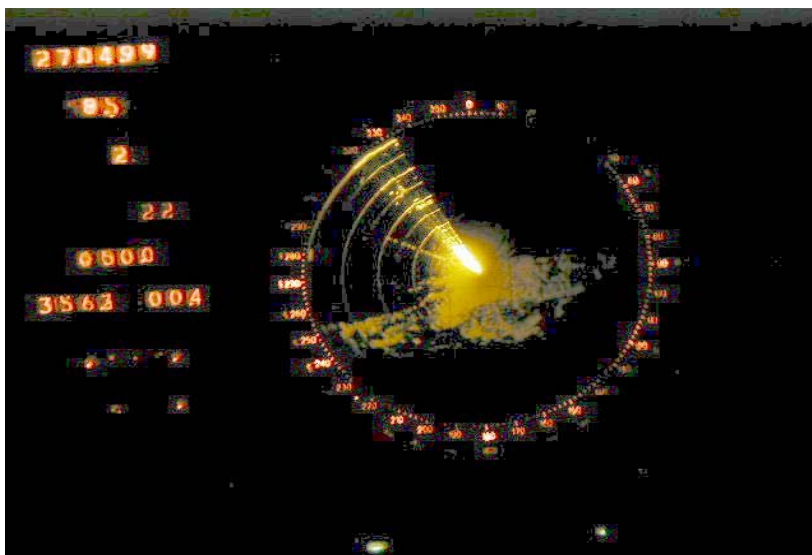
FECHA	FENÓMENO METEOROLÓGICO	TIPO DE PENETRACIÓN
23-9-75	HURACÁN ELOISE	Fuerte
19-1-77	F. F. FUERTE	Fuerte
2-3-80	F. F. FUERTE	Moderada
5-11-82	F. F. FUERTE	Ligera
18-3-83	BAJA EXTRATROPICAL	Fuerte
27-2-84	F. F. MODERADO	Moderada
29-3-84	F. F. MODERADO	Ligera
23-11-84	F. F. MODERADO	Ligera
4-1-85	F. F. MODERADO	Ligera
12-2-85	F. F. MODERADO	Ligera
29-10-85	HURACÁN JUAN	Fuerte
19-11-85	HURACÁN KATE	Moderada
5-1-87	BAJA EXTRATROPICAL	Fuerte
23-1-87	F. F. MODERADO	Ligera
12-10-87	HURACÁN FLOYD	Fuerte
25-1-88	F. F. MODERADO	Ligera
12-4-88	BAJA EXTRATROPICAL	Moderada
15-2-91	F. F. MODERADO	Ligera
6-2-92	BAJA EXTRATROPICAL	Fuerte
13-3-93	BAJA EXTRATROPICAL	Fuerte
3-3-94	BAJA EXTRATROPICAL	Moderada
14-11-94	Tormenta Tropical Gordon	Ligera
23-12-94	Baja Extratropical	Ligera
4-10-95	Huracán Opal	Ligera
8-01-96	F.F. Fuerte	Ligera
8-03-96	F.F. Fuerte	Ligera
20-03-96	F.F. Moderado	Ligera
14-12-97	F.F. Moderado	Ligera
27-12-97	F.F. Fuerte	Ligera
4-02-98	Baja Extratropical	Moderada
25-09-98	Huracán Georges	Ligera
15-03-99	F.F. Moderado	Ligera

15-10-99	Huracán Irene	Ligera
24-01-00	F.F. Moderado	Ligera

En 25 años, el total de afectaciones de penetraciones es de 331 casos. De esas 33 situaciones sinópticas que ocasionaron inundaciones costeras por penetraciones del mar corresponde en primer orden el 54.5 % a los frentes fríos, en segundo orden el 24.2 % a las bajas extratropicales y en tercer orden el 21.3 % queda reservado para las tormentas tropicales y los huracanes. Estas cifras expresadas en por ciento permiten conocer que la frecuencia de afectación al paso de los sistemas frontales merece especial atención y de ahí la necesidad de desarrollar este trabajo.

Estos fenómenos son perfectamente captados en la pantalla del ordenador de los radares meteorológicos,(Fig 1). Por esta razón se propone, que mediante un algoritmo donde se relacionan variables hidrometeorológicas y radaricas, que al someter a tratamiento estadístico la muestra de datos, haciendo uso adecuado de las técnicas de Análisis de Regresión Múltiple y el Análisis Discriminante conduzca a la obtención de una función que permita determinar la altura de las olas y posteriormente clasificar el estado de la mar.

Figura 1 - Imagen captada por el Radar MRL-5 y cedida por el compañero Orestes González Marrero. Frente frío del día 27/4/94.



Análisis del oleaje mediante el radar MRL - 5

A partir de los datos proporcionados por el Radar MRL-5 realizamos el siguiente estudio sobre el oleaje. Este tipo de radar trabaja en banda de 10 cm y con una emisión y recepción polarizada en la horizontal. En la pantalla de este dispositivo, la imagen que se forma a causa del retorno de energía proporcionada por las partículas de agua que constituyen el oleaje, se debe a la retrodispersión de los campos electromagnéticos por la superficie del mar, la imagen de este patrón se define como "Sea Clutter", es decir, turbulencia del mar. Por esta razón, dicha imagen de radar en relación con el mar se considera como ruido para los propósitos de este tipo de dispositivo. La señal que se analizará es bastante débil ya que la energía dispersada por la superficie del mar no será nunca tan grande como la energía reflejada por un gran objeto, como pueden ser celdas de nubes de desarrollo vertical tipo cumulonimbus.

La señal de retorno captada en el receptor del radar debido a un campo de oleaje no es una imagen directa y fiel de la superficie del mar en estudio, ya que se producen diversos fenómenos que afectan a la dispersión de los campos electromagnéticos por las ondas capilares. Dichos efectos producen modulaciones y distorsiones en la señal y se pueden resumir en los siguientes.

Dependencia en azimut: uno de los resultados de Bragg consiste en que sólo se detectan los campos dispersados por las **ondas capilares**, que son aquellas que se distinguen por las fuerzas que tratan de volver la partícula de agua a la posición de equilibrio. En este caso la fuerza de recuperación es la fuerza de tensión superficial. Estas olas por su dimensión son pequeñas y se forman al inicio de la acción del viento sobre la superficie (rizo), o en la superficie de las olas de gravedad principales (olas secundarias). (Egorov, cap. VII, epig. # 34, pág. 244) que viajan en dirección de la antena del radar. Teniendo esto en cuenta el retorno en la pantalla de radar será más intenso en aquellas direcciones que coincidan con la dirección de propagación de las ondas capilares, y por tanto con la dirección del viento local.

Dependencia con la velocidad del viento: a medida que el viento local aumenta el valor de la sección eficaz de retrodispersión σ crece obteniendo imágenes más

intensas. Así por ejemplo, para un mismo tipo de mar de fondo el retorno del radar no será igual cuando las condiciones del viento local cambien.

El radar empleado en el presente trabajo se localiza en la Loma de Casa Blanca, Ciudad de La Habana, muy próximo al litoral capitalino a unos de 60 metros de altura sobre el nivel del mar, en los $23^{\circ} 15' N$ y $82^{\circ} 35' W$. (Fi g. 2)

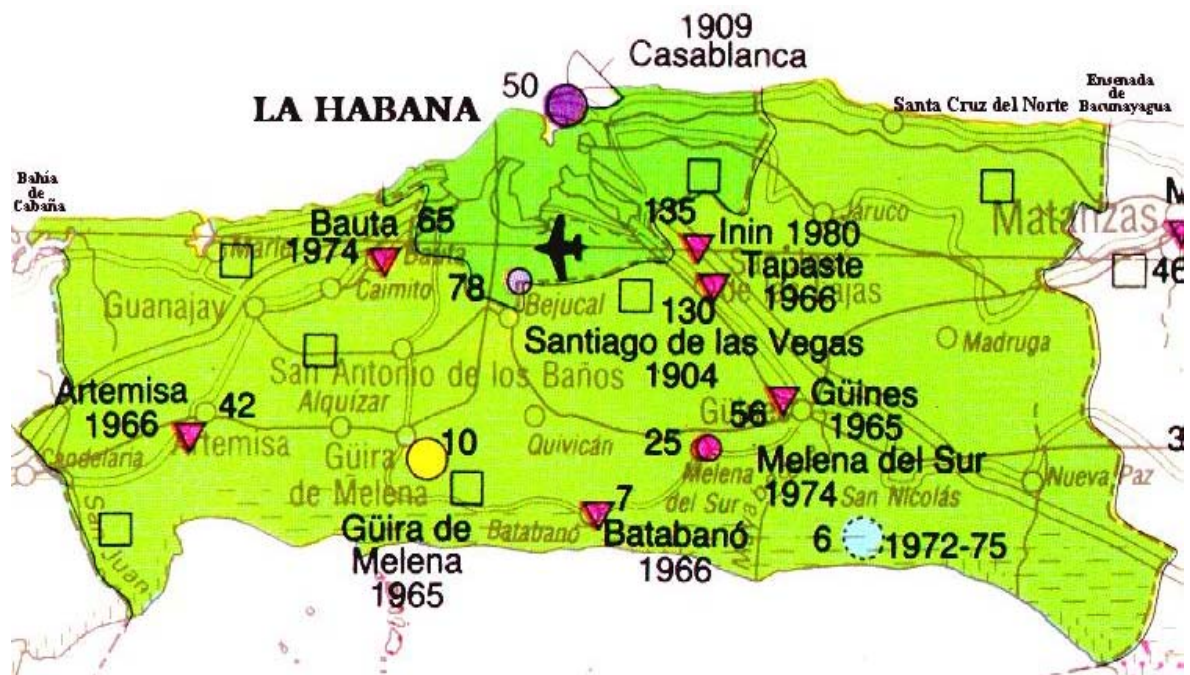


Figura 2. Mapa del territorio de las provincias de La Ciudad de La Habana y La Habana, en el que localiza la ubicación del radar meteorológico de Casa Blanca.

Zona Físico - Geográfica

Descripción físico- geográfica del área de estudio, costa norte de las provincias habaneras.

La costa norte de la provincia de la Habana y ciudad de la Habana se extiende a lo largo de 116.9 km desde la Bahía Cabaña hasta Ensenada Bacunayagua. Es en general rocosa y acantilada, con segmentos de playas, cortadas por varios ríos. Al oeste y próximo a la Bahía del Mariel existen zonas de cierto interés económico, donde figuran sembrados de henequén y pastos para la alimentación de ganado mayor. Además existen a lo largo del borde costero instalaciones de verano y

deportes náuticos, hoteles, y viviendas, donde se tiene que desde el río Almendares hasta la Bahía de la Habana la costa se encuentra protegida por el malecón y a sólo unos pocos metros del mismo edificios multifamiliares.

La plataforma insular con profundidades inferiores a 1 m, bordea la costa desde Mariel hasta la dársena de Barlovento, con una amplitud máxima de 0.92 Km, después las profundidades aumentan bruscamente y la isobata de 200 m (línea que une los puntos de igual valor de profundidad) cruza a 0.92 – 1.5 Km del veril de este bajo costero. En las zonas de playas hasta 4.6 Km al este de la desembocadura del río Jaimanitas, hay un bajo costero arenoso, a menos de 1 m de profundidad que bota hasta 0.74 Km de la costa, después en dirección este y hasta las proximidades del río Almendares, el bajo costero se estrecha y se mantiene a 0.2 Km de la costa en varios lugares. A partir del río Almendares y en toda la zona de la costa que protege al malecón, el bajo costero es mínimo. En este lugar hay tres niveles de terrazas submarinas casi paralelas al litoral. La primera y más cercana tiene su veril a 0.2 – 0.28 Km de la costa con profundidades de 1 m, la segunda desciende 3 - 4 m y se separa del veril anterior 0.56- 0.74 Km y la tercera, después del veril de la segunda baja 15 – 18 m más y se extiende hasta 1.7 – 2 Km al norte del veril anterior. Las profundidades del bajo costero y de las terrazas submarinas, aumentan abruptamente. Las isobatas de 200 m cruza a 1.85 Km de la costa y en algunos lugares más cerca. La navegación costera en esta zona está libre de peligros.

Un bajo costero de arena y rocoso en parte a menos de 10 m de profundidad bordea la costa en toda su extensión de amplitud mínima en el extremo Oeste y máxima de 2.6 km frente a la playa de Guanabo Este bajo costero es acantilado y posee en algunos puntos cabezos y rocas aisladas a menos profundidad que constituyen elemento de preocupación y peligro para la navegación.

Punta Tijera señala la entrada E a la Boca de Jaruco, y Punta Jijira, 2.2 Km al SE de la punta antes citada la cual resulta de interés en la orientación para la navegación costera.

El río Jibacoa desemboca a 6.1 Km al E de la boca del río Santa Cruz y lo hace en una caleta de costas altas y rocosas que se destaca bien en marcación 180°.

Las costas de la Ensenada de Bacunayagua en sus puntas de entrada, así como en litoral este y oeste, son bajas, rocosas y acantiladas.

Objetivos principales del trabajo

- Obtener mediante análisis y procesamientos de variables meteorológicas, hidrometeorológicas y radaricas obtener una función que permita obtener la altura de la ola.
- Clasificar el estado de la mar a partir del dato obtenido de altura de la ola.
- Obtener un algoritmo que posibilite realizar una validación del estado de la mar clasificado.
- Hacer factible la aplicación del método obtenido, en la práctica sistemática, en el Departamento de Pronósticos Marinos.

Materiales y Métodos

Para el desarrollo de este trabajo se contó inicialmente con una data de 1017 casos, obtenidos en el período desde el 1970 hasta el 2000, específicamente dentro de las temporadas invernales correspondiente a 1970 –1971 hasta 1999 – 2000.

Las fuentes de donde se obtuvo la información que constituyó la data fueron:

La Cronología de frentes fríos, donde fue posible comprobar que cada uno de los casos incorporados a la data, afectaron el litoral norte de las provincias habaneras.

La masa de datos referida a los valores de intensidad del campo de viento se extrajo de los mapas hidrometeorológicas que se elaboran en el departamento de Meteorología Marina.

Para la obtención de los datos, en el caso de la variable **(Veloc.V)**. se siguió el procedimiento del cálculo del viento geostrófico en el área de interés, a una distancia de 33 Km de la costa en la dirección en que se localiza el punto geográfico con las coordenadas $23^{\circ} 15' N$ y $82^{\circ} 35' W$.

- La variable **(Hsig)**, se obtuvo mediante cálculo realizado por el sistema computacional denominado **MET-OLA**, desarrollado e introducido a la práctica del servicio sistemático del citado departamento por Juantorena. Y. A. 1999.

Presentación de las variables que inicialmente fueron consideradas para el presente estudio:

- **Velocidad del viento (Veloc. V)**
- **Altura de la ola, (Hsig) y Período de la ola, (τ)**
- **Radio Máximo, (Rmáx), Radio Medio, (Rmed), Radio Mínimo, (Rmin.)**

Es importante señalar que debido a la no-existencia de una metodología apropiada para obtener imágenes del patrón característico, en el indicador PPI del radar, resultó considerable la cantidad de situaciones en que según los valores de la intensidad del viento debió existir un reporte de imágenes del patrón antes citado. Esto condujo a que se efectuara un análisis de aquellos casos y fue posible evidenciar que en los mismos no se obtuvo reporte a causa de que el ángulo de elevación de antena empleado no posibilitaba tener señal de retorno de las gotas dispersadas sobre la superficie marina.

Después de chequear los casos en que estuvo presente el patrón de radio –ecos de referencia, se llevó a cabo un experimento que consistió en verificar de manera práctica el diapasón de valores de ángulos de elevación, bajo el cual es posible obtener la imagen relacionada con estados alterados de la superficie marina. Finalmente se llegó a que el umbral de valores de ángulos de elevación de antena óptimo, para alcanzar el objetivo planteado oscila entre 0.0 y 0.4 grados. Concluido el experimento se elaboró una metodología básica para realizar observaciones con el radar y lograr obtener información mediante las imágenes representadas en el indicador PPI o en la pantalla del ordenador acoplado al radar, donde las imágenes se muestran digitalizadas.

Tratamiento estadístico de la muestra de datos.

Del total de casos, solamente se escogieron definitivamente 317 correspondiente a situaciones en que los trenes de olas afectaban directamente la costa Noroccidental de Cuba. Posteriormente se aplicó el tratamiento estadístico de Regresión lineal múltiple, según el método paso a paso.

Dicho procedimiento permitió obtener los valores medios, desviaciones estándares, así como los coeficientes de correlación de las variables seleccionadas como predictores, incluido el por ciento de buena clasificación y finalmente la función pronóstico, para el cálculo de la altura de las olas.

Predictores y Predictando.

- Los predictores son: **Veloc.V**, **Rmax** y **Rmed**. - El predictando es: **Hsig**.

A continuación se presentan los resultados del procesamiento estadístico de la muestra llevado a efecto haciendo uso de los sistemas Statistics y el SPSS, en la búsqueda de la función pronóstico.

Variable	Media	Standard Desv	Casos
Veloc.V	8,8887	3,0365	316
Rmax	30,6930	7,1849	316
Rmed	25,8196	7,2596	316
Hsig	2,1104	1,3759	316

- - - COEFICIENTES DE CORRELACION PARCIALES - - -

Parciales de orden cero

	Veloc.V	Rmax	Rmed	Hsig
Veloc.V	1,0000 (0) P= ,	,5074 (314) P= ,000	,5362 (314) P= ,000	,9543 (314) P= ,000
Rmax	,5074 (314) P= ,000	1,0000 (0) P= ,	,9647 (314) P= ,000	,5816 (314) P= ,000

Rmed	,5362	,9647	1,0000	,6008
	(314)	(314)	(0)	(314)
	P= ,000	P= ,000	P= ,	P= ,000

Hsig	,9543	,5816	,6008	1,0000
	(314)	(314)	(314)	(0)
	P= ,000	P= ,000	P= ,000	P= ,

(Coeficiente / (D.F.) / Doble Significación

", " Esto es si ocurre que un coeficiente no puede ser computado.

- - - COEFICIENTES DE CORRELACION PARCIALES - - -

Fijando a:	Hsig		
	Veloc.V	Rmax	Rmed
Veloc.V	1,0000	-,1961	-,1557
	(0)	(313)	(313)
	P= ,	P= ,000	P= ,006
Rmax	-,1961	1,0000	,9461
	(313)	(0)	(313)
	P= ,000	P= ,	P= ,000
Rmed	-,1557	,9461	1,0000
	(313)	(313)	(0)
	P= ,006	P= ,000	P= ,

(Coeficiente / (D.F.) / Doble Significación, " , " Esto es si ocurre que un coeficiente no puede ser computado.

Al efectuar el análisis de los resultados alcanzados en la matriz de correlación parcial fijado el predictando, para la obtención de los coeficientes de las variables tomadas en cuenta se pudo ver que la relación entre los predictores puede calificarse de baja apoyados en los valores de los coeficientes y que el grado de significación que posee cada uno que es inferior a 0.5.

Tenemos que el valor del coeficiente de correlación parcial que relaciona a Veloc.V con Rmax es de - 0, 1961, por otro lado ocurre que el coeficiente de correlación parcial que vincula a Veloc.V con Rmed es de - 0, 1557. Ahora bien el coeficiente de correlación parcial que asocia Rmed con Rmax es de 0, 9461

En lo que respecta al grado de independencia de los predictores con el predictando, es posible decir de los resultados obtenidos que tanto Rmax como Rmed, con respecto a Hsig es moderada, dado que el coeficiente de correlación entre Rmax y Hsig es de 0,5816, así como sucede entre Rmed y Hsig es de 0,6008.

Tabla – 2 COEFICIENTES

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	T	Sig.
		B	Err. Stand.	Beta		
1	Veloc.V	0.258	0.004	0.961	61.861	0.000
2	Veloc.V	0.364	0.013	1.358	27.395	0.000
	Rmax	-3.312E -05	0.000	-0.414	-8.352	0.000
3	Veloc.V	0.357	0.012	1.329	28.548	0.000
	Rmax	-1.214E -04	0.000	-1.517	-8.986	0.000
	Rmed	1.067E -04	0.000	1.135	6.795	0.000

a. Variable dependiente Hsig, b Regresión lineal paso a paso

Tabla – 3 REGRESION

Sumario del modelo

Modelo	R	R al cuadrado ^a	R al cuadrado ajustada	Error standard del estimado
1	0.973 ^b	0.946	0.945	0.5888

a. Para la regresión lineal paso a paso (el modelo sin intercepto), R al cuadrado mide la proporción de la variabilidad en la variable dependiente o predictando en torno al origen explicado por regresión. Esto no puede ser comparado con la R al cuadrado para modelos que incluyen un intercepto.

b. Son los predictores: Veloc.V, Rmáx, Rmed

Resultados

La ecuación de regresión lineal múltiple adopta la siguiente forma.

Hsig.= 0,357 * Veloc. V – 0.00012 * Rmax + 0.000106 * Rmed (Función pronóstico) R² = 0.945, P< 0.001

Donde:

Hsig.- Es el promedio del tercio de las olas más altas presentes.

Rmax: Es la distancia máxima a la que el radar capta el oleaje.

Rmed: Es la distancia media a la que el radar capta el oleaje.

Veloc. V: Es la velocidad que actúa en un punto localizado a 33 Km de la costa.

Se tiene que la varianza explicada de la función es $S = 0.9721$, para un 97 %.

Ahora bien resulta de gran interés dar a conocer la forma en que cada variable interviene como aporte en la ecuación de regresión arriba planteada.

Variables Failing Tolerance Test

	Within-Groups Variance	Tolerance	Minimum Tolerance
RMEDIO	19.454	.000	.000

All variables passing the tolerance criteria are entered simultaneously.

a. Minimum tolerance level is .001.

Summary of Canonical Discriminant Functions

Eigenvalues

Function	Eigenvalue	% of Variance	Cumulative %	Canonical Correlation
1	18.418 ^a	92.3	92.3	.974
2	1.286 ^a	6.4	98.8	.750
3	.176 ^a	.9	99.7	.387
4	.068 ^a	.3	100.0	.252

a. First 4 canonical discriminant functions were used in the analysis.

La muestra de datos antes mencionadas se sometió a un análisis del cual se obtuvo una estratificación para los diferentes intervalos de la altura significativa de las olas (Hsig.) lo que permitió determinar siete grupos, a los que se les aplicó la técnica estadística de **Análisis Discriminante** y como resultado se obtuvieron las siguientes tablas que contienen el resultado del tratamiento estadístico relacionado con la técnica antes citada.

Tabla - 5

Funciones lineales discriminantes de Fisher

	CODIGO						
	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00	6.00	7.00
Hsig	-13.580	-12.296	-8.068	-3.144	5.524	20.164	49.208
Veloc.V	5.144	6.243	7.219	7.561	7.885	7.824	4.891
Rmax	2.030	2.020	1.852	1.694	1.287	1.599	1.543
Rmin	-.566	-.500	-.707	-.704	-.570	-.420	-.471
(constante)	-4.294	-41.477	-42.806	-48.356	-61.127	-124.730	-232.212

a)- 82.9 % de los casos originales agrupados están correctamente clasificados.

Finalmente se alcanzaron las funciones siguientes:

$$F = -13.580 * Hsig + 5.144 * Veloc.V + 2.030 * Rmax - 0.566 * Rmin - 34.294$$

F, evaluada en la media del grupo es igual a 30.39383

Esta función define la presencia de la **Mar tranquila (0.1- 0.5) m**

$$F = -12.296 * Hsig + 6.243 * Veloc. V + 2.020 * Rmax - 0.500 * Rmin - 41.477$$

F, evaluada en la media del grupo es igual a 37.5886947

Esta función define la situación de **Poco oleaje. (0.5- 1.0) m**

$$F = -8.068 * Hsig + 7.219 * Veloc.V + 1.852 * Rmax - 0.77 * Rmin - 42.806$$

F, evaluada en la media del grupo es igual a 38.8986623

Esta función define el estado de la mar correspondiente a **Oleaje con precaución para embarcaciones pequeñas. (1.0-1.5) m**

$$F = -3.144 * Hsig + 7.561 * Veloc.V + 1.694 * Rmax - 0.704 * Rmin - 48.356$$

F, evaluada en la media del grupo es igual a 44.4527969

Esta función define el estado de la mar correspondiente a **Marejada peligrosas para embarcaciones pequeñas. (1.5-2.0) m**

$$F = 5.524 * Hsig + 7.885 * Veloc. V + 1.287 * Rmax - 0.570 * Rmin - 61.127$$

F, evaluada en la media del grupo es igual a 57.2347904.

Esta función define el estado de la mar correspondiente a **Marejadas peligrosas para embarcaciones menores. (2.0-3.5) m**

$$F = 20.164 * Hsig + 7.824 * Veloc. V + 1.599 * Rmax - 0.420 * Rmin - 124.730$$

F, evaluada en la media del grupo es igual a 120. 664591

Esta función define el estado de la mar correspondiente a **Fuertes marejadas con peligro para la navegación. (3.5-5.5) m**

$$F = 49.208 * H_{sig.} + 4.891 * Veloc. V + 1.543 * R_{max.} - 0.471 * R_{min} - 232.212$$

F, evaluada en la media del grupo es igual a 228.332416

Esta función define el estado de la mar correspondiente a **Grandes marejadas con peligro para la navegación. (5.5-7.5) m**

Después de culminar con este último proceso se procedió a realizar la requerida comprobación haciendo uso de una muestra independiente, la cual constituyó el 27 % de la muestra original, correspondiente a un total de 85 casos, comprendido en el período 1980 – 1984. Se determinó la diferencia entre el valor real y el valor calculado, con el objetivo de conocer la desviación estándar y de este modo proporcionar un pronóstico lo más cercano a la realidad.

La propuesta de esta metodología tiene como elemento de gran importancia, que al no existir antecedentes del empleo de los radares meteorológicos en este sentido en Cuba, este trabajo se convierte en la apertura de lo que después puede conducir a su generalización para su adecuada aplicación a la vigilancia sistemática en toda red nacional de radares, con el fin de suministrar información a los diferentes centros meteorológicos provinciales y nacional sobre el comportamiento del estado de la mar para las diferentes áreas de responsabilidad de cada estación. Todo esto a partir de haberse demostrado que las variables radáricas R_{max} , R_{med} y la velocidad del viento $Veloc. V$ en el área posibilitan con eficiencia estimar la altura significativa de las olas.

Por otro lado, es bueno señalar que si bien es cierto lo referido anteriormente, el hecho de trabajar con este tipo de radar que su longitud de onda (λ) es de 10 cm, constituye una limitación real en la metodología propuesta, que pudiera ser superada de poder contar para este objetivo con el empleo de una longitud de onda (λ) de 3 cm. Esta es la apropiada dada las características de la relación existente entre la magnitud del diámetro de los pequeñísimos hidrometeoros que se encuentran dispersos en el aire, producto de la influencia que ejerce el viento sobre la superficie del mar mientras fluye sobre ella. Es decir el nivel de los resultados con que las variables radáricas explican el proceso debería ser mejor.

CONCLUSIONES.

- 1 - Se obtuvo un método para calcular la altura de la ola de manera indirecta, con un margen de error aceptable de 0.900 metros
- 2 - Se elaboró un programa que posibilita la ejecución de los cálculos previstos en el método, aspecto que le entrega operatividad.
- 3 - Se creó un sistema de codificación para las estaciones de radar, con el fin de poder emitir información sobre el estado de la mar, siguiendo un formato similar al empleado en la elaboración de los telegramas cifrados de carácter nacional.
- 4 - A partir de la determinación de la altura de las olas por este método es posible tener una precisión mayor en la clasificación del estado de la mar, para la costa norte de las provincias habaneras al paso de los sistemas frontales.
- 5.- Fueron obtenidas siete funciones para la determinación de diferentes estados de la mar a través del algoritmo en que se relacionan las variables: Altura significativa de las olas, la Velocidad del viento tomada a la distancia de unos 33 kilómetros de la ubicación de Casa Blanca, el Radio máximo y el Radio mínimo del patrón de radio - ecos.
- 6 - Se elaboró una tesis de maestría, la que fue defendida exitosamente formando parte de este resultado

Recomendaciones.

Se sugiere que a partir de los resultados obtenidos y el grado de eficiencia del método, el mismo se introduzca a la práctica sistemática y operativa de diagnóstico y pronóstico del estado de la mar.

- 2- El valor de la variable velocidad del viento (Veloc.V) no debe ser tomado de la estación Casa Blanca, ya que las pruebas realizadas demostraron que no se ajusta a la realidad.

Referencias:

- 1- EgorovL.N (1983): Oceanografía Física. (segunda edición, revisada y ampliada). Vneshtorgizdat Moscú. 553 pp.

- 2- Hasselmann. S. (1962): On the nonlinear energy transfer in a gravite wave spectrum. Part 1: general thery j.fluie mech., 12481: 50 pp.
- 3- Hasselmann, et al. (1973): measurements of wind –wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Proyct (JONSWAP), Dtch. Hydrogr. Z., A8 (12).
- 4- Juantorena Y. et al. (1997): Cálculo del oleaje en mar profundo mediante técnica espectral en los sistemas frontales. Departamento de Meteorología Marina, INSMET. Ciudad de La Habana. 22 pp.
- 5- Mitrani I. et al (2000): Las Penetraciones del Mar en las Costas de Cuba, las Zonas más Expuestas su Sensibilidad al Cambio Climático. CITMA, Instituto de Meteorología. 100 pp.
- 6- Mitrani I. et al. (1997): Características hidrometeorológicas generales de la zona costera correspondiente al Malecón habanero. Instituto de Meteorología. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente.36 pp.
- 7- Mitrani I. et al. (1983): Determinación del régimen de ola y viento en la costa Norte de La Habana. Instituto de Meteorología, INSMET. 10 pp.
- 8- Pérez, J, O et al (1984): Análisis hidrometeorológico y estadístico de las penetraciones del mar ocurridas en el Malecón Habanero.
- 9- Peñate (1990): “Desarrollo de un método objetivo de diagnóstico y pronóstico del campo de ola en los mares adyacentes a Cuba”, tesis de doctorado INSMET.,136 pp.
- 10- Vega R et al (1990): Análisis estadístico climatológico del régimen de la velocidad máxima del viento en Cuba. 67 pp.