

Pronóstico de Inundaciones Costeras en Cuba. Parte I. Diseño general del algoritmo y pronóstico de inundaciones costeras en la costa norte de Cuba.

Autor: MIGUEL A. PORTELA SANTIAGO

Centro de Pronósticos. Instituto de Meteorología. E-mail: portela@mail.met.inf.cu

Resumen

Se desarrollan dos métodos de análisis multivariado para el pronóstico de la ocurrencia de inundaciones costeras por penetración del mar en Cuba y para el pronóstico de la altura de la ola significativa asociada a esas situaciones.

Introducción.

Las inundaciones costeras en Cuba constituyen una amenaza permanente a la vida humana y al desarrollo socioeconómico en las zonas costeras de Cuba, donde realizan sus actividades más de un millón de personas. Aunque el número de pérdidas humanas ha venido disminuyendo el peligro subsiste. Por otra parte, las pérdidas económicas aumentan a un ritmo creciente. De acuerdo a las consecuencias previstas de los cambios climáticos globales un aumento sostenido en el nivel medio del mar incrementará aún más la vulnerabilidad de las zonas costeras. De ahí la importancia de mejorar continuamente el sistema de mitigación de los desastres costeros. Desde hace años en Cuba se ha venido prestando atención a las inundaciones costeras. Para realizar esta investigación se han tomado en cuenta los trabajos realizados por Mitrani et al. (1984), Díaz y Casals

(1987), Díaz et al. (1988), Pérez et al. (1994) y Pérez et al. (1995). Este trabajo constituye un sistema integral de pronóstico de la ocurrencia, duración e intensidad de las inundaciones costeras en Cuba mediante métodos de análisis multivariado. Para caracterizar el grado de afectación marina a la zona costera se introduce una escala de intensidades y una terminología asociada a la misma. Se define que el alcance es la distancia dentro del territorio a la que llega el agua del mar en terrenos bajos o al nivel del mar con un estado normal de drenaje. Las costas de Cuba se dividen en dos tipos bien delimitados: Tipo a : Costas que tienen estrecha plataforma insular, o sea las aguas son profundas estando cerca del litoral el canto del veril Tipo b : Costas que tienen plataforma insular ancha, a menudo bordeada por cayos. Se pueden entonces dividir las costas de Cuba en los tramos que aparecen en la Tabla 1 (Instituto Cubano de Hidrografía, 1989a, Instituto Cubano de Hidrografía, 1989b).

Tabla 1. Tramos de las costas de Cuba según su tipo.

COSTA NORTE:	
Cabo San Antonio a Punta Gobernadora	Tipo b
Punta Gobernadora a Punta Hicacos	Tipo a (Incluye el Malecón habanero)
Punta Hicacos a Punta Maternillos	Tipo b (Incluye archipiélago Sabana - Camagüey)
Punta Maternillos a Punta Maisí	Tipo a
COSTA SUR:	
Punta Maisí a Cabo Cruz	Tipo a
Cabo Cruz a Casilda	Tipo b (Incluye archipiélago Jardines de la Reina)
Casilda a Playa Girón	Tipo a
Playa Girón a Cabo Francés	Tipo b (Incluye Isla de la Juventud, golfo de Batabanó y el resto del Archipiélago de los Canarreos)
Cabo Francés a Cabo San Antonio	Tipo a

La tabla 2 generaliza el criterio del umbral de altura de la ola (H) empleado por Pérez et al (1994) para clasificar la intensidad de las inundaciones costeras por penetraciones del mar en la costa norte de la ciudad de La Habana.

Tabla 2. Escala de grados de intensidad de la afectación marina al litoral.

Int.	Terminología	H (Tipo a)	H (Tipo b)	Efectos	Alcance
0	Régimen normal	$H < 1.5m$	$H < 0.25m$	No hay	$A = 0$
1	Derrame	$1.5m \leq H \leq 2.5m$	$0.25m \leq H \leq 0.50$	No hay acumulación progresiva	$A < 100m$
2	Inundaciones Costeras Ligeras	$2.5m < H \leq 4.0m$	$0.50m < H \leq 0.75m$	Acumulación progresiva	$A < 100m$
3	Inundaciones Costeras Moderadas	$4.0m < H \leq 5.0m$	$0.75m < H \leq 1.0m$	Acumulación progresiva	$100m \leq A \leq 200m$
4	Inundaciones Costeras Severas	$H > 5.0m$	$H > 1.0m$	Acumulación progresiva	$A > 200m$

Tabla 3. Situaciones sinópticas favorables para ocurrencia de inundaciones costeras en Cuba.

Tipo Situación sinóptica	Región	Meses
1 Frente frío en el sudeste del Golfo de México con un Anticiclón en el NW del Golfo de México o sobre los EE.UU. y una baja extratropical en la mitad oriental del Golfo de México.	Costa Norte occidental	Noviembre - Abril
2 Baja extratropical en la mitad norte del Golfo de México o baja de desprendimiento al norte de la Florida, moviéndose al NE con forma de zanahoria en el campo Nuboso.	Costa Norte occidental	Diciembre - Abril
3 Ciclón tropical en el NE o posición central norte del Golfo de México con movimiento lento al NW o N.	Costa Norte occidental	Junio - Noviembre
4 Frente frío fuerte o moderado, seguido de fuerte Chubasco de presión con vientos fuertes, persistentes y de gran recorrido	Costa Norte occidental	Noviembre - Abril
5 Ciclón tropical al norte de Cuba, moviéndose paralelo a la costa o estacionario cerca de Cuba.	Costa Norte al oeste del CT, Costa Sur al este del CT,	Junio - Noviembre
6 Baja originada al SE del Golfo de México o sobre Yucatán que se mueve rápido al NE.	Costa Norte occidental	Noviembre - Abril
7 Gradiente fuerte entre una baja extratropical y un Anticiclón situado entre 35 N y 40 N.	Baracoa	Noviembre - Abril
8 Huracán con trayectoria de Cuba a Las Bahamas	Baracoa	Junio - Noviembre
9 Anticiclón intenso en combinación con un frente frío sobre Haití. El anticiclón con lento movimiento al este y en una latitud cercana a la de Cuba	Baracoa	Noviembre - Abril
10 Anticiclón al este de Cabo Hatteras que se intensifica y provoca oleaje que llega a Baracoa en varios días.	Baracoa	Septiembre - Abril
11 Baja extratropical intensa en la mitad sur del Golfo de México o frente frío fuerte próximo a afectar a Cuba con gran persistencia en una situación de Estacionamiento	Costa Sur occidental	Noviembre - Abril
12 Ciclón tropical al sur de Cuba moviéndose con lentitud y generando una marea de tormenta	Costa Sur al este del CT, Costa Norte al oeste del CT,	Junio - Noviembre
13 Surcos	Costa Sur occidental	Enero - Abril

El término derrame llamado también salpicaduras (spray) o embarque de agua es empleado para caracterizar lo que ocurre cuando algunas cantidades de agua caen sobre el territorio sin generar una inundación costera pues los sistemas de drenaje son capaces de evitar que se acumule progresivamente el agua. El alcance dentro del territorio de las inundaciones costeras aumenta en proporción directa con la intensidad.

En los 23 años que comprende la muestra de trabajo (1975-1997) ocurrieron 34 eventos pero se seleccionaron un total de 27 eventos para la misma, o sea en promedio algo más de uno por año con 142 casos. Los otros 7 eventos no se seleccionaron debido a que no contaban con toda la información requerida. Un evento está conformado por los días en que ocurrió inundación costera y por el día anterior y el día posterior en que no ocurrió inundación costera. Cada día utilizado representa un caso. De esa forma, si solamente ocurrió inundación costera un día, el evento está constituido por tres casos. Debido a que el número total de eventos no es alto fue necesario agrupar eventos de diferentes tipos (Tabla 3) en tres estratos de forma que fueran constituidos por situaciones sinópticas compatibles. El primer estrato con 12 eventos y 63 casos fue conformado

por los tipos sinópticos 1,2,3 y 5. El segundo estrato coincide con el tipo sinóptico 4 y abarca 11 eventos con 58 casos. El tercer estrato agrupa los eventos de inundaciones costeras en el litoral norte oriental, fundamentalmente en Baracoa, e incluye los tipos sinópticos 7, 8 y 10 con un total de 4 eventos y un tamaño de 21 casos. En el primer estrato hay 15 casos de inundaciones costeras y 48 en que no ocurrieron, en el segundo estrato son 14 los casos de inundaciones costeras y 44 los correspondientes a los días anteriores y posteriores en que no ocurrió inundación costera mientras que en el tercer estrato fueron 5 los casos de ocurrencia de inundaciones costeras y 16 los de no-ocurrencia del fenómeno. Se registraron 6 eventos del tipo 1, 1 del tipo 2, 2 del tipo 3, 11 del tipo 4, 3 del tipo 5, 2 del tipo 7 y 1 de los tipos 8 y 10 respectivamente. En los últimos 23 años no se registraron casos de los tipos 6, 9, 11 y 12. El tipo 13 es estudiado como un cuarto estrato en la Parte II de esta investigación. En la Tabla 3 se incluyen las situaciones meteorológicas que resultan favorables para la ocurrencia de inundaciones costeras en Cuba según el criterio de los diez especialistas consultados siguientes: Pedro J. Pérez, Lázara Díaz, Acacia del Sol, Nilo Hernández, Sandra Samper, Alberto Lewis, Armando Caymares, Arnaldo Alfonso, Rolando Martínez e Isidro Salas.

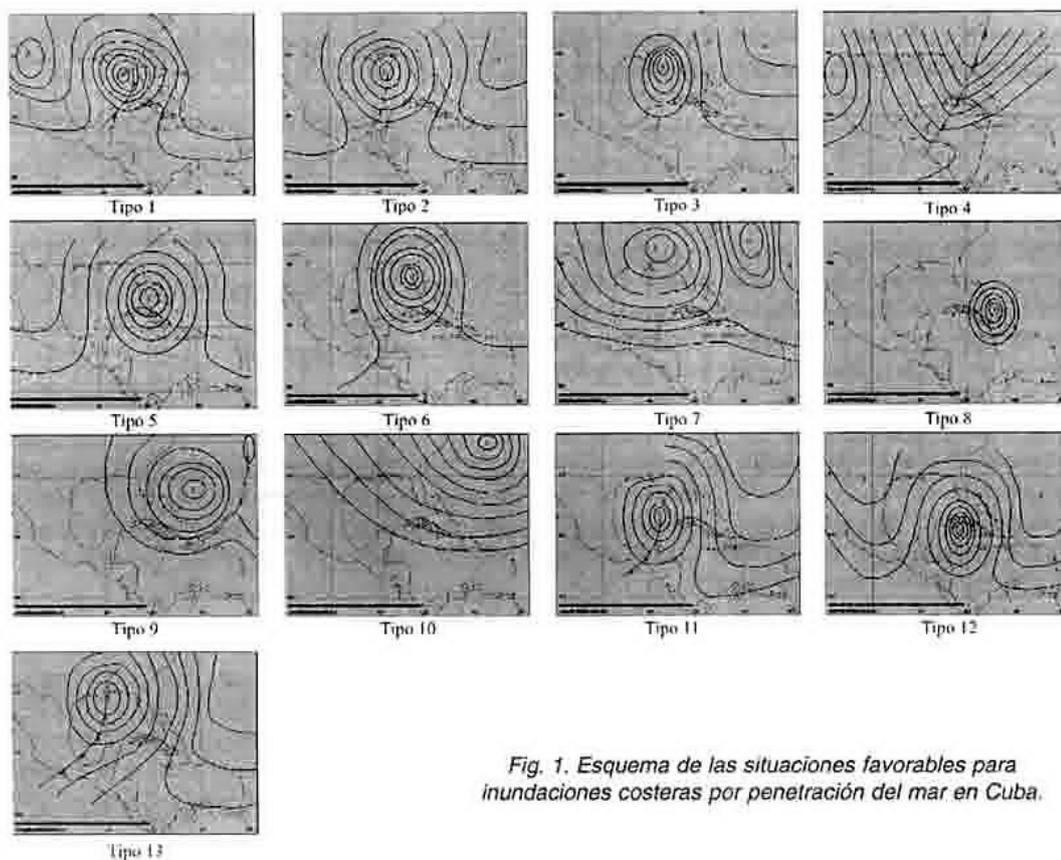


Fig. 1. Esquema de las situaciones favorables para inundaciones costeras por penetración del mar en Cuba.

La Figura 1 ilustra esquemáticamente los rasgos principales de las 8 situaciones contempladas en los tres estratos considerados en esta parte de la investigación, así como el resto de las configuraciones sinópticas favorables. El uso de esta figura constituye el primer paso para un pronóstico efectivo de inundaciones costeras en Cuba. En primer término, de no existir ninguna de las 13 configuraciones sinópticas y de no existir tampoco mapas pronóstico que reflejen la eventual configuración de alguna de estas situaciones se pronosticará la no-ocurrencia de inundaciones costeras. De existir alguna se procederá a la determinación del estrato adecuado.

Diseño del algoritmo.

Para definir el predictando y los predictores, así como otras características del algoritmo se utilizó el sistema de encuesta, dirigida al grupo de especialistas mencionados, cuyas respuestas fueron contrastadas y conciliadas con los requerimientos del tratamiento estadístico de los datos. Como predictando se utilizó la altura significativa de las olas en el litoral dentro de 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42 y 48 horas. Al valor real del predictando estimado por los métodos de cálculo de la ola significativa (Coastal Engineering Research Center, 1984) se le restó algebraicamente el valor de la marea astronómica para obtener una ecuación que determine el valor del predictando sin tomar en cuenta la marea astronómica. Al emplear la ecuación así obtenida bajo condiciones operativas se debe añadir algebraicamente la marea astronómica según el lugar y el plazo al predictando calculado para así lograr el resultado final. Como predictores potenciales de campo se consideraron la intensidad del viento en superficie y en el nivel de 850 hPa, la dirección del viento en superficie y en el nivel de 850 hPa., la tendencia de la presión, la presión, el viento al cuadrado en superficie y en el nivel de 850 hPa, el geopotencial del nivel de 850 hPa. y como predictores potenciales empíricos se consideraron la persistencia o duración, el fetch, o sea el alcance o recorrido máximo del viento en la misma dirección sobre la superficie marina, la presión central de la baja o del ciclón tropical, la presión del centro del anticiclón, la diferencia entre la presión central del anticiclón y del ciclón, el gradiente de presión entre la periferia y el centro de circulación, el ángulo con que el ciclón tropical o la baja se aproxima a la costa, la rapidez de traslación del sistema, la dirección del movimiento del sistema, el radio del viento máximo, el tamaño del sistema, el viento máximo del sistema, la distancia del sistema al litoral, la tendencia de la presión central del sistema, la presión en las boyas del golfo de México 42001, 42002 y 42003 y la dirección y rapidez del viento en las boyas mencionadas. Se incluyen los casos de los días en

que ocurren inundaciones costeras y de dos días antes y dos días después. Mediante análisis discriminante se logra pronosticar la ocurrencia de inundaciones costeras. El grupo 1 caracteriza la ocurrencia de inundaciones costeras y el grupo 2 se conforma con los casos en que no ocurren inundaciones costeras.

Se obtuvieron ecuaciones de regresión lineal con predictores de tipo empírico y de tipo sinóptico de forma separada.

$$YE = INT + \sum_{i=1}^n c_i \cdot E_i \quad (1)$$

$$YS = INT + \sum_{k=1}^m c_k \cdot S_k \quad (2)$$

donde :

INT es el valor del intercepto de las ecuaciones

E_i son predictores de tipo empírico

S_k son predictores de tipo sinóptico

c_i, c_k son los coeficientes de regresión de las ecuaciones de predictores empíricos y sinópticos

n y m son la cantidad de predictores empíricos y sinópticos respectivamente. Posteriormente se procedió a calcular una regresión a través de un polinomio de segundo grado del tipo:

$$YF = A + BYE + CYS + DYE^2 + EYS^2 + F.YEYS \quad (3) \text{ donde:}$$

YE es el valor del predictando calculado por la ecuación lineal de predictores empíricos

YS es el valor del predictando calculado por la ecuación lineal de predictores sinópticos

YF es el valor del predictando calculado por la ecuación cuadrática A, B, C, D, E y F son los coeficientes de regresión.

Mediante estas ecuaciones cuadráticas se puede pronosticar la altura de las olas significativas para los plazos desde 6 hasta 48 horas. Estas ecuaciones se pueden emplear siempre que se dé alguna de las situaciones sinópticas resumidas en la Tabla 3. Este método posibilita el pronóstico del estado del mar en los tramos de las costas de Cuba bajo las condiciones descritas. Pero su uso principal es precisar bajo el pronóstico de ocurrencia de una inundación costera su intensidad y persistencia, así como ratificar o no el propio pronóstico de ocurrencia de una inundación costera. El algoritmo termina con el desarrollo de dos programas independientes para el Pronóstico de la Ocurrencia de Inundaciones Costeras y para el Pronóstico de la altura de la ola significativa.

Tabla 4 Cronología de inundaciones costeras ocurridas en Cuba, sin incluir las producidas por sures.

AÑO MES	DÍA	FENÓMENO METEOROLÓGICO	LUGAR
1810	OCT 25	HURACÁN	CN CIUDAD HABANA
1812	OCT 4	HURACÁN	CASHIDA
1844	OCT	HURACÁN	CN MATANZAS
1846	OCT 11	HURACÁN	CN MATANZAS
1873	OCT 6	HURACÁN	CN CIUDAD HABANA
1874		HURACÁN	CN CIUDAD HABANA
1887	DIC 1-3	HURACÁN	BARACOA
1888	SEP 4-5	HURACÁN	CN HABANA-LAS VILLAS
1896	SEP 3	HURACÁN	BARACOA
1899	AGO 22	HURACÁN	BARACOA
1908	SEP 23	TORMENTA TROPICAL	BARACOA
1909	OCT 10-11	HURACÁN (MI)	CN CIUDAD HABANA
1916	AGO 23	TORMENTA TROPICAL	BARACOA
1919	SEP 9-10	HURACÁN (MI)	CN REG OCCID
1926	OCT 20	HURACÁN (GI)	CN HABANA-CS BATABANÓ
1932	NOV 9	HURACÁN	CS SANTA CRUZ DEL SUR
1933	AGO SEP 31-2	HURACÁN (GI)	CN MATANZAS-LAS VILLAS
1942	MAR 3	BAJA EXTRATROPICAL	CN CIUDAD HABANA
1944	OCT 17-18	HURACÁN (GI)	CS REG OCCID
1952	FEB 27	BAJA EXTRATROPICAL	CN CIUDAD HABANA
1953	SEP 24	HURACÁN	
1954	OCT 13	HURACÁN HAZEL	BARACOA
1955	SEP 13	HURACÁN HILDA	BARACOA
1958	ENE 2-3	BAJA EXTRATROPICAL	CN CIUDAD HABANA
1958	ENE 4	BAJA EXTRATROPICAL	BARACOA
1966	ENE 26	FRENTE FRÍO FUERTE	CN CIUDAD HABANA
1970	ENE 3	FRENTE FRÍO FUERTE	CN CIUDAD HABANA
1975	SEP 23	HURACÁN BELOISE	CN CIUDAD HABANA
1977	ENE 16-19	FRENTE FRÍO FUERTE	CN CIUDAD HABANA
1979	SEP 1	HURACÁN FREDERIC	BARACOA
1980	MAR 2	FRENTE FRÍO FUERTE	CN CIUDAD HABANA
1982	OCT 13	GRADIENTE FUERTE	BARACOA
1982	NOV 5	FRENTE FRÍO FUERTE	CN CIUDAD HABANA
1983	MAR 17-18	BAJA EXTRATROPICAL	CN CIUDAD HABANA
1984	FEB 27-28	FRENTE FRÍO MODERADO	CN CIUDAD HABANA
1984	MAR 29	FRENTE FRÍO MODERADO	CN CIUDAD HABANA
1984	NOV 22-23	FRENTE FRÍO MODERADO	CN CIUDAD HABANA
1985	ENE 4	FRENTE FRÍO MODERADO	CN CIUDAD HABANA
1985	FEB 12	FRENTE FRÍO MODERADO	CN CIUDAD HABANA
1985	OCT 28-29	HURACÁN JUAN	CN CIUDAD HABANA
1985	NOV 19	HURACÁN KATL	CN VILLA CLARA-MATANZAS
1987	ENE 4-5	BAJA EXTRATROPICAL	CN CIUDAD HABANA
1987	ENE 22-23	FRENTE FRÍO MODERADO	CN CIUDAD HABANA
1987	OCT 12	HURACÁN FLOYD	CN CIUDAD HABANA
1988	ENE 25	FRENTE FRÍO MODERADO	CN CIUDAD HABANA
1988	ENE 34	ANTICICLÓN	BARACOA
1988	ABR 12	BAJA EXTRATROPICAL	CN CIUDAD HABANA
1991	FEB 15	FRENTE FRÍO MODERADO	CN CIUDAD HABANA
1991	NOV 2	GRADIENTE FUERTE	BARACOA
1992	FEB 6	BAJA EXTRATROPICAL	CN HABANA-VARADERO
1993	MAR 13	BAJA EXTRATROPICAL	CN CIUDAD HABANA
1993	MAR 16-17	ANTICICLÓN	BARACOA
1994	MAR 3	BAJA EXTRATROPICAL	CN CIUDAD HABANA
1994	OCT 17-18	GRADIENTE FUERTE	BARACOA
1994	NOV 14	HURACÁN GORDON	CN HABANA-VARADERO
1994	DIC 18	BAJA EXTRATROPICAL	BARACOA
1996	DIC 23	BAJA EXTRATROPICAL	CN CIUDAD HABANA
1996	FEB 7	GRADIENTE FUERTE	BARACOA
1996	AGO 30	HURACÁN EDUARD	CN HOLGUÍN-GLANTÁNAMO
1996	NOV 17	GRADIENTE FUERTE	CN BARACOA
1996	ABR 3	GRADIENTE FUERTE	CN HOLGUÍN-GLANTÁNAMO

Los casos utilizados fueron seleccionados a partir de la cronología anterior que recoge la Tabla 4. La distribución mensual de los 34 eventos aparece en la siguiente tabla.

Tabla 5. Ocurrencia de Inundaciones Costeras en Cuba, sin incluir las producidas por sures (1975-1997)

Meses	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Número	6	5	6	2	0	0	0	1	2	4	6	2
Porcentaje	17.6	14.7	17.6	5.9	0.0	0.0	0.0	3.0	5.9	11.8	17.6	5.9

Ecuaciones obtenidas

Los predictores empíricos seleccionados fueron:

- E1.- Altura significativa de la ola inicial en el lugar de inundación costera (metros).
- E2.- Altura significativa de la ola 12 horas antes en el lugar de inundación costera (metros).
- E3.- Cambio en la altura significativa de la ola en las últimas 12 horas (metros).
- E4.- Persistencia o Duración (horas).
- E5.- Dirección del viento en superficie en la boya 42003 (grados).
- E6.- Si entre 25-30 ° N y 85-90 ° W hay altura significativa mayor de 4 m 1, si no la hay 0.
- E7.- Si hay convergencia de isobaras 1, si no la hay 0.
- E8.- Altura significativa de la ola inicial en la zona generadora (metros)

Los predictores de campo o sinópticos seleccionados fueron:

- S1.- Rapidez del viento en superficie en la estación 72340 (nudos).
- S2.- Rapidez del viento al cuadrado en superficie en la estación 72232 (nudos).
- S3.- Rapidez del viento al cuadrado en superficie en la estación 72230 (nudos).
- S4.- Rapidez del viento en 850 hPa en la estación 72215 (nudos).
- S5.- Rapidez del viento al cuadrado en superficie en la estación 72210 (nudos).
- S6.- Rapidez del viento en 850 hPa en la estación 72210 (nudos).
- S7.- Altura geopotencial en 850 hPa en la estación 72210 (Dgpm).
- S8.- Rapidez del viento en superficie en la estación 72201 (nudos).
- S9.- Altura geopotencial en 850 hPa en la estación 72201 (Dgpm).
- S10.-Tendencia de presión en las últimas 3 horas en la estación 76644 (hPa).
- S11.-Rapidez del viento al cuadrado en superficie en la estación 78583 (nudos).
- S12.-Dirección del viento en superficie en la estación 78583 (grados).
- S13.-Rapidez del viento en 850 hPa en la estación 78073 (nudos).
- S14.-Rapidez del viento al cuadrado en 850 hPa en la estación 78073 (nudos).

Tabla 6. Funciones Discriminantes (Estrato 1)

Función Discriminante	Grupo 1	Grupo 2
Constante	-1144.08700	-1122.21300
E1	7.81840	6.86099
E3	9.11112	8.44169
E6	21.61072	20.09399
E7	15.58490	12.03817
E8	-0.00031	-0.29877
S3	0.00673	-0.00014
S6	0.63372	0.55881
S9	14.76966	14.69846
S14	0.02694	0.02545

Tabla 7. Funciones Discriminantes (Estrato 2)

Función Discriminante	Grupo 1	Grupo 2
Constante	-1768.20300	-1803.793
E1	-1.39495	-3.77638
E6	0.52079	2.40562
E8	7.53523	7.24491
S3	0.42010	0.42353
S5	0.05707	0.06346
S7	23.35032	23.64721
S8	-3.92350	-3.86094
S10	5.68789	4.37113
S11	-0.38561	-0.39707
S12	0.05187	0.03813
S13	3.13967	3.12169

Tabla 8. Funciones Discriminantes (Estrato 3)

Función Discriminante	Grupo 1	Grupo 2
Constante	-39.10647	-13.56353
E1	10.00844	3.95528
E2	2.48472	2.06611
E4	-0.37874	-0.28053
E5	0.06726	0.04350
E8	1.67013	0.87822
S1	0.83462	0.42449
S2	0.06488	0.04177
S4	0.02464	0.29922

Las 9 - 14 aparecen las ecuaciones lineales obtenidas, señalándose los predictores que intervienen y a la notación introducida con anterioridad y los coeficientes de regresión respectivos para todos los plazos.

Tabla 9. Ecuaciones de regresión lineal con predictores empíricos (Estrato 1).

PRED.	6	12	18	24	30	36	42	48
INT.	0.02794	0.05857	0.83361	1.32213	1.48559	1.21571	1.67817	1.92995
E1	0.46670	0.13198	-0.09147	-0.41966	-0.36999	-0.28131	-0.17370	-0.15382
E3	0.03470	-0.05180	0.09545	0.25707	0.25431	0.05183	0.07274	0.07379
E6	0.65225	0.82352	0.69117	0.84219	0.31822	-0.14734	-0.92257	-1.23031
E7	0.12192	0.51192	0.29736	-0.18401	-0.13466	0.6632 3	1.04505	1.23299
E8	0.09050	0.13330	0.08556	0.17285	0.15436	0.07173	-0.05189	-0.11919

Tabla 10. Ecuaciones de regresión lineal con predictores sinópticos (Estrato 1).

PRED.	6	12	18	24	30	36	42	48
INT.	6.78262	4.40362	7.81118	10.11465	-3.22307	-1.33325	1.30300	0.94505
S3	0.00246	0.00150	0.00286	0.00238	0.00066	-0.00050	-0.00187	-0.00199
S6	0.00786	0.02287	0.01623	0.02366	0.00884	-0.00119	-0.00810	-0.01276
S9	-0.04401	-0.02841	-0.04840	-0.06161	0.02836	0.01805	0.00408	0.00770
S14	0.00115	0.00061	0.00020	-0.00030	0.00035	-0.00006	-0.00028	-0.00034

Tabla 11. Ecuaciones de regresión lineal con predictores empíricos (Estrato 2).

PRED.	6	12	18	24	30	36	42	48
INT.	-0.06581	-0.05104	0.36889	0.90303	1.06429	1.02268	1.38440	1.58214
E1	0.60928	0.10292	-0.13507	-0.59924	-0.36969	-0.35843	-0.32334	-0.25017
E6	0.28344	0.71002	0.56456	0.36035	0.16188	-0.08569	-0.14173	-1.14866
E8	0.07853	0.31292	0.33232	0.57120	0.28713	0.28537	0.16757	0.25063

Tabla 12. Ecuaciones de regresión lineal con predictores sinópticos (Estrato 2).

PRED.	6	12	18	24	30	36	42	48
INT.	8.87903	7.75903	11.8803	19.48455	12.62061	11.09041	8.65743	8.06450
S3	-0.00145	-0.00041	0.00234	0.00231	0.00143	0.00062	0.00119	-0.00031
S5	0.00189	0.00143	-0.00066	0.00330	0.00334	0.00428	0.00337	0.00448
S7	-0.06456	-0.05325	-0.07339	-0.11390	-0.06874	-0.06112	-0.04364	-0.03351
S8	0.04619	0.01586	-0.01482	-0.03830	-0.02304	-0.00110	0.02979	-0.00093
S10	0.10594	0.03978	0.08192	0.05721	0.24878	0.14606	0.03119	0.10956
S11	0.00884	0.00490	0.00000	-0.00634	-0.00579	-0.00107	-0.00207	-0.00038
S12	0.00117	0.00166	0.00259	0.00299	0.00139	-0.00139	-0.00108	-0.00220
S13	0.02871	0.02194	-0.00459	-0.05068	-0.05133	-0.04570	-0.06794	-0.07679

Tabla 13. Ecuaciones de regresión lineal con predictores empíricos (Estrato 3).

PRED.	6	12	18	24	30	36	42	48
INT.	-0.23600	0.40795	0.62870	2.05729	2.41773	2.49959	2.28575	2.73846
E1	0.89602	0.79449	0.48597	0.34798	0.16724	0.23563	0.03884	0.06901
E2	-0.13385	-0.31933	-0.19147	-0.64298	-0.66516	-0.77812	-0.61060	-0.76041
E4	0.02677	0.02410	0.03898	0.03551	0.04142	0.02643	0.02051	0.00600
E4	-0.00263	-0.00182	-0.00390	-0.00454	-0.00626	-0.00407	-0.00240	-0.00204
E8	0.04362	0.03394	0.03011	0.03376	0.03153	0.01539	0.03050	0.04280

Tabla 14. Ecuaciones de regresión lineal con predictores sinópticos (Estrato 3).

PRED.	6	12	18	24	30	36	42	48
INT.	-0.06624	0.25119	-0.03839	0.82746	-0.26122	0.25163	0.02464	0.44011
S1	0.12649	0.08784	0.07213	-0.00189	0.01491	0.00481	0.01833	0.01850
S2	0.00496	0.00514	0.00400	0.00504	0.00804	0.00542	0.00453	0.00015
S4	-0.00786	0.00031	0.02078	0.01722	0.04746	0.03923	0.04797	0.05011

En las Tablas 15 - 17 aparecen las ecuaciones de regresión cuadráticas para todos los estratos y plazos.

Tabla 15. Ecuaciones de regresión cuadrática (Estrato 1).

PLAZO	A	B	C	D	E	F
6	-.5696620	1.076662	.7895958	-.200730	-.2802134	.3089442
12	-.7045999	.112411	1.8556840	.1558229	-.6755269	.2576800
18	-.5936704	-2.425775	3.8054550	1.186564	-.7943754	-.3844634
24	-.7242376	.0389421	1.4853220	1.318765	.7140088	-2.186876
30	-4.627846	4.273737	1.5743210	.323277	.8318464	-2.089879
36	-6.268880	-4.837065	16.200640	.0270470	-8.815636	4.5715510
42	2.3042660	-2.070584	-1.0598310	.450792	-.2702015	1.9533500
48	1.2330970	-1.174789	-2.1570150	.2464771	-.2275033	.9599559

Tabla 16. Ecuaciones de regresión cuadrática (Estrato 2).

PLAZO	A	B	C	D	E	F
6	-.1119723	.9643366	.171859	-.0909021	.2537457	-.1214019
12	-.2591220	1.0109270	.2611887	.0705884	.268947	-.3836356
18	-.9511439	1.530930	.7715894	-.266123	.2851805	-.6343642
24	1.2273980	-.4061266	-1.5190170	.0870892	.5227703	.6043952
30	1.7790750	-.9656457	-2.0186790	-.0949309	.4892205	1.4991490
36	-.6758883	1.9880250	1.4176020	-.2243947	1.2297660	-.3358748
42	.8185417	.1107661	-1.2718810	-.1168047	.5533432	.6367345
48	1.0760480	-.9984062	-.5474400	-.2998016	.2152190	.5565957

Tabla 17. Ecuaciones de regresión cuadrática (Estrato 3).

PLAZO	A	B	C	D	E	F
6	-.3133708	1.0391860	.1279735	.1286412	.2003819	-.3562913
12	-.0403702	2.1594240	-1.4256010	-.0284195	.8531344	-.6562754
18	-.8967001	2.6939090	-.7858428	-.2260924	.7646560	-.6541081
24	2.2202350	-.5964859	-1.4682530	.4565019	.3734535	.1157839
30	-.5362358	.8419986	.2274549	.2125456	.2654887	-.3488162
36	.1696452	.5941103	-.69422346	.3835765	.5908412	-.4326085
42	-.7442951	.4933364	.8965704	.1741705	-.0434231	-.0613414
48	2.4876500	.0126031	-3.6298660	.4014490	1.4602500	-.1149074

En las tablas 18 – 20 aparecen los errores estándar para todos los métodos, plazos y estratos.

Tabla 18. Error Standard de los diferentes métodos según los plazos. Estrato 1 (m)

METODO	6	12	18	24	30	36	42	48
STEPR	0.911	0.913	1.400	1.599	1.460	1.243	1.407	1.539
REGRE T	0.899	0.935	1.438	1.647	1.518	1.288	1.470	1.611
REGRE E	0.968	0.966	1.431	1.639	1.557	1.267	1.428	1.558
REGRE C	1.218	1.170	1.427	1.659	1.588	1.329	1.493	1.660
POL. SEG.	0.883	0.863	1.244	1.469	1.434	1.182	1.318	1.435

Tabla 19. Error Standard de los diferentes métodos según los plazos. Estrato 2 (m)

METODO	6	12	18	24	30	36	42	48
STEPR	0.649	0.671	1.013	1.474	1.256	1.015	1.056	1.627
REGRE T	0.657	0.697	1.064	1.519	1.275	1.021	1.100	1.710
REGRE E	0.772	0.709	1.101	1.603	1.392	1.182	1.221	1.702
REGRE C	0.798	0.899	1.154	1.755	1.376	1.212	1.189	1.689
POL. SEG.	0.554	0.634	0.955	1.301	1.141	0.953	1.012	1.508

Tabla 20. Error Standard de los diferentes métodos según los plazos. Estrato 3. (m)

METODO	6	12	18	24	30	36	42	48
STEPR	0.298	0.515	0.636	1.109	1.062	0.974	0.682	0.870
REGRE T	0.284	0.558	0.684	1.272	1.141	1.047	0.760	1.021
REGRE E	0.389	0.564	0.694	1.141	1.101	0.979	0.792	0.984
REGRE C	1.198	1.089	1.025	1.293	1.173	1.144	0.869	1.252
POL. SEG.	0.272	0.430	0.505	0.984	0.901	0.811	0.621	0.759

En la tabla 21 aparecen los errores absolutos medios de la ecuación cuadrática final para todos los plazos y estratos.

Tabla 21. Error absoluto medio del polinomio cuadrático según los plazos. y estratos (m).

ESTRATO	6	12	18	24	30	36	42	48
1	0.620	0.666	0.933	1.062	1.119	0.965	1.015	1.076
2	0.420	0.442	0.739	0.866	0.797	0.737	0.812	1.107
3	0.213	0.350	0.350	0.757	0.642	0.594	0.455	0.528

En las tablas 22 - 24 aparecen los porcentajes de casos con errores menores que un valor señalado para todos los plazos de acuerdo al estrato.

Tabla 22. Porcentaje de casos con errores menores que el valor señalado. Estrato 1 (m).

PLAZO	E = 0.5	E = 1.0	E = 1.5	E = 2.0	E = 2.5	E = 3.0	E = 3.5
6	81.0	92.1	95.2	98.4	98.4	98.4	98.4
12	79.4	90.5	95.2	96.8	98.4	100.0	100.0
18	71.4	84.1	90.5	92.1	93.7	93.7	98.4
24	77.8	82.5	87.3	88.9	92.1	93.7	95.2
30	69.8	79.4	84.1	87.3	92.1	96.8	96.8
36	68.3	77.8	88.9	93.7	96.8	100.0	100.0
42	69.8	81.0	84.1	90.5	93.7	98.4	100.0
48	71.4	79.4	84.1	92.1	95.2	95.2	95.2

Tabla 23. Porcentaje de casos con errores menores que el valor señalado. Estrato 2 (m).

PLAZO	E = 0.5	E = 1.0	E = 1.5	E = 2.0	E = 2.5	E = 3.0	E = 3.5
6	82.8	98.3	98.3	100.0	100.0	100.0	100.0
12	82.8	93.1	96.6	98.3	100.0	100.0	100.0
18	74.1	86.2	93.1	94.8	96.6	100.0	100.0
24	77.6	84.5	89.7	94.8	96.6	96.6	96.6
30	81.0	86.2	91.4	94.8	96.6	96.6	98.3
36	75.9	86.2	93.1	94.8	98.3	98.3	100.0
42	69.0	82.8	93.1	93.1	98.3	100.0	100.0
48	70.7	84.5	87.9	91.4	91.4	93.1	94.8

Tabla 24. Porcentaje de casos con errores menores que el valor señalado. Estrato 3 (m).

PLAZO	E = 0.5	E = 1.0	E = 1.5	E = 2.0	E = 2.5	E = 3.0	E = 3.5
6	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
12	90.5	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
18	85.7	95.2	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
24	76.2	81.0	85.7	100.0	100.0	100.0	100.0
30	81.0	85.7	85.7	100.0	100.0	100.0	100.0
36	85.7	85.7	95.2	95.2	100.0	100.0	100.0
42	81.0	95.2	95.2	100.0	100.0	100.0	100.0
48	81.0	90.5	90.5	100.0	100.0	100.0	100.0

En la tabla 25 aparece el valor del coeficiente de correlación para cuatro niveles de significación en dependencia del número de grados de libertad

Tabla 25. Valor del coeficiente de correlación para diferentes niveles de significación.

ESTRATO	Grados de libertad	10%	5%	2%	1%
1	61	0.2093	0.2482	0.2927	0.3225
2	56	0.2187	0.2593	0.3056	0.3365
3	19	0.3687	0.4329	0.5034	0.5487

En la tabla 26 aparecen los valores de los coeficientes de correlación múltiples de todas las ecuaciones de regresión halladas para los diferentes plazos para hallar la significación estadísticas de las mismas.

Tabla 26. Valor del coeficiente de correlación múltiple de las ecuaciones de regresión.

Ecuación	6	12	18	24	30	36	42	48
Emp. Est. 1	0.79578	0.71634	0.38637	0.33935	0.28852	0.34134	0.38541	0.43709
Sin. Est. 1	0.63956	0.52298	0.37271	0.27846	0.17331	0.09974	0.22895	0.25558
Pol. Cuad. Est. 1	0.81888	0.75608	0.58834	0.46650	0.39398	0.39187	0.43864	0.49040
Emp. Est. 2	0.85712	0.82801	0.55496	0.49760	0.33355	0.37382	0.33593	0.32883
Sin. Est. 2	0.86183	0.73548	0.55704	0.42587	0.46042	0.42465	0.48721	0.45008
Pol. Cuad. Est. 2	0.92471	0.85669	0.66369	0.69563	0.60525	0.64186	0.58771	0.51976
Emp. Est. 3	0.96466	0.90143	0.81623	0.59161	0.62384	0.66384	0.67219	0.72363
Sin. Est. 3	0.50537	0.45489	0.41674	0.23033	0.46343	0.36656	0.50329	0.35358
Pol. Cuad. Est. 3	0.97765	0.92702	0.87873	0.62196	0.69023	0.71108	0.75778	0.80025

Análisis de los resultados.

La altura de la ola significativa aumenta durante las 12 horas previas a la ocurrencia de una inundación costera. En todos los estratos en los casos de ocurrencia de inundaciones costeras el valor medio de la ola significativa inicial es mayor de 3 metros, mientras que cuando no ocurre inundación costera el valor medio es siempre menor de 1.5 metros. El valor medio de la persistencia en los casos de ocurrencia de inundación costera en todos los estratos es superior a las 17 horas, mientras que en los casos en que no ocurre inundación costera en ningún estrato este parámetro superó las 9 horas. El valor medio del fetch para los estratos 1 y 2 en los casos de ocurrencia de inundaciones costeras es siempre mayor de 700 kilómetros mientras que en los casos en que no ocurre inundación costera este parámetro es menor de 450 kilómetros. Sin embargo, en el caso de los eventos que afectan la costa norte oriental, es decir, los que refleja el estrato 3 este parámetro es mucho mayor que en los otros estratos pero es aún mayor para los casos en que no ocurre inundación costera que para los casos en que se da este fenómeno. En este caso, el valor del fetch no es determinante para la ocurrencia o no del fenómeno. Si bien el valor medio del viento es algo mayor en los casos en que ocurre inundación costera que en los casos en que no ocurre en los estratos 1 y 2, en el estrato 3 este indicador es muy poco informativo e inclusive ligeramente superior en los casos en que no ocurre inundación costera. De lo anterior se deduce lo difícil que resulta hacer un pronóstico acertado de modo subjetivo a partir del análisis de valores de parámetros individuales, aún en el caso de considerar aquellos más informativos. De ahí, la importancia del diseño de métodos de pronóstico objetivos que sean capaces de conjugar la influencia simultánea de un grupo de parámetros. El método de análisis discriminante permitió clasificar correctamente el 95.1 % de los

casos. El porcentaje de cumplimiento más bajo se registró en el estrato 1 y resultó de 93.7 %. El estrato 2 tuvo el mayor cumplimiento con un 96.5 % de los casos clasificados correctamente. Por su parte, el estrato 3 asignó correctamente el grupo al 95.2 % de los casos.

El menor cumplimiento se corresponde con el estrato que agrupa a un mayor número de tipos de situaciones sinópticas. Con respecto a las ecuaciones de regresión, para cualquiera de los plazos y estratos los mejores resultados se obtienen al separar los predictores empíricos y sinópticos altamente informativos e independientes entre sí y utilizar los predictores calculados por el método de regresión lineal de forma separada para los predictores de cada tipo como predictores de una ecuación de regresión cuadrática. El mayor error ocurre en el estrato 1 para el plazo de 30 horas y es solamente de 1.119 metros. En el plazo peor para el Estrato 1 en el 68.3 % de los casos el error de pronóstico de la altura de ola significativa es menor de 0.5 metros, mientras que esta cifra es de 69.0 % de los casos para el estrato 2 y en el estrato 3 el 76.2 % en el plazo peor presenta errores de menos de 0.5 metros. Para el estrato 1 solamente el 12.7 % de los casos presenta errores en el pronóstico de la altura de la ola significativa superiores a los 2 metros, esta cifra se reduce al 6.9 % de los casos en el estrato 2 y al 4.8 % de los casos en el estrato 3. Las ecuaciones cuadráticas resultaron significativas al nivel del 1 % para todos los estratos y plazos.

Conclusión.

La calidad de los resultados de las ecuaciones estadísticas obtenidas sobrepasa las expectativas iniciales por el alto porcentaje de cumplimiento, el valor de los errores medios y la alta significación de las ecuaciones finales. Los resultados dotan al

Servicio Meteorológico de Cuba con métodos eficientes para pronosticar las inundaciones costeras por penetraciones del mar en la costa norte de Cuba.

Referencias.

Coastal Engineering Research Center (1984): Shore Protection Manual. Army Corps of Engineering.., U.S. Govt. Print. Off. Washington.

Díaz L., R. Casals. (1987): Análisis de algunas características hidrometeorológicas del huracán Juan. Boletín hidroclimático marino No. 41. Editorial Academia.

Díaz L., I. Mitrani, P.J. Pérez (1988): Determinación del oleaje característico de fenómenos que han producido penetraciones del mar en la costa norte de La Habana. Facultad de Geografía. Universidad de La Habana. 53 pp.

Instituto Cubano de Hidrografía (1989a): Derrotero de las costas de Cuba. Tomo I Región marítima del norte. Editorial Científico-Técnica. 368 pp.

Instituto Cubano de Hidrografía (1989b): Derrotero de las costas de Cuba. Tomo II Región marítima del sur. Editorial Científico-Técnica. 259 pp.

Mitrani I., M. Fontova, L. Díaz, J. González (1984): Determinación del régimen de olas y vientos en la costa norte de La Habana. Centro de Documentación de las BTJ. ACC. La Habana. D.5625.MIT.D 15 pp.

Pérez P., R. Casals, L. Díaz, R. Vega, A. del Sol (1994): Análisis hidrometeorológico y estadístico de las penetraciones del mar ocurridas en el Malecón habanero. Departamento de Meteorología Marina. Instituto de Meteorología. CITMA. 56 pp.

Pérez P., R. Casals, A. del Sol (1995): Oleaje generado por la baja extratropical del 6 de febrero de 1992 y sus consecuencias para el Malecón habanero. Boletín SOMETCUBA. Vol. 1. No. 2

Reconocimiento.

Se agradece a Rosa M. Cárdenas su colaboración para la inclusión de las figuras y a Daniela Arcia su ayuda en la preparación del fichero de datos iniciales. La extracción de los datos fue llevada a cabo por el Lic. Reynaldo Casals con la ayuda de Lic. Sandra Samper.

Abstract.

Two multivariate analysis methods to forecast the occurrence of coastal sea floodings in Cuba and the significant waveheight associated to these situations are developed.