Tabla 1.2.3 Cronología de las inundaciones costeras ocurridas en Cuba

Año/mes	Día	Fenómeno Meteorológico	Lugar
1810 OCT	25	HURACAN	CN CIUDAD HABANA
1812 OCT	4	HURACAN	CASILDA
1844 OCT		HURACAN	CN MATANZAS
1846 OCT		HURACAN	CN MATANZAS
1873 OCT	6	HURACAN	CN CIUDAD HABANA
1874		HURACAN	CN CIUDAD HABANA
1887 DIC	1-3	HURACAN	BARACOA
1888 SET	4-5	HURACAN	CN HABANA-VILLA CLARA
1896 SET	3	HURACAN	BARACOA
1899 AGO	22	HURACAN	BARACOA
1908 SET	23	TORMENTA TROPICAL	BARACOA
1909 OCT	10-11	HURACAN (MI)	CN CIUDAD HABANA
1916 AGO	23	TORMENTA TROPICAL	BARACOA
1919 SET	9-10	HURACAN (MI)	CN REG. OCCID.
1926 OCT	20	HURACAN (GI)	CN HABANA,CS BATABANO
1932 NOV	9	HURACAN	CS SANTA CRUZ DEL SUR
1933 AGO-SET	31-2	HURACAN (GI)	CN MATANZAS- V. CLARA
1942 MAR	3	BAJA EXTRATROPICAL	CN CIUDAD HABANA
1944 OCT	17-18	HURACAN (GI)	CS REG. OCCID.
1952 FEB		FRENTE FRIO	
1953 SEP	24	HURACAN	
1954 OCT	13	HURACAN HAZEL	BARACOA
1955 SET	13	HURACAN HILDA	BARACOA
1958 ENE L	2-3	BAJA EXTRATROPICAL	CN CIUDAD HABANA
1958 ENE	4	BAJA EXTRATROPICAL	BARACOA
1966 ENE		FRENTE FRIO	
1969 AGO		HURACAN (GI) CAMILLE	CN CIUDAD HABANA
1972		HURACAN AGNES	CN CIUDAD HABANA
1974 SET		HURACAN FIFI	CS ISLA DE LA JUVENTUD
1975 SET	23	HURACAN ELOISE	CN CIUDAD HABANA
1977 ENE	16-19	FRENTE FRIO FUERTE	CN CIUDAD HABANA
1979 SET	1	HURACAN FREDERIC	BARACOA
1980 MAR	2	FRENTE FRIO FUERTE	CN CIUDAD HABANA
1982 OCT	13	GRADIENTE FUERTE	BARACOA
1982 NOV	5	FRENTE FRIO FUERTE	CN CIUDAD HABANA
1983 MAR	17-18	BAJA EXTRATROPICAL	CN CIUDAD HABANA
1984 FEB	27-28	FRENTE FRIO MODERADO	CN CIUDAD HABANA
1984 MAR	29	FRENTE FRIO MODERADO	CN CIUDAD HABANA
1984 NOV	22-23	FRENTE FRIO MODERADO	CN CIUDAD HABANA
1985 ENE	4	FRENTE FRIO MODERADO	CN CIUDAD HABANA
1985 FEB	12	FRENTE FRIO MODERADO	CN CIUDAD HABANA
1985 OCT	28-29	HURACAN JUAN	CN CIUDAD HABANA
1985 NOV	19	HURACAN KATE	CN MATANZAS-VARADERO
1987 ENE	4-5	BAJA EXTRATROPICAL	CN CIUDAD HABANA
1987 ENE	22-23	FRENTE FRIO MODERADO	CN CIUDAD HABANA
1987 OCT	12	HURACAN FLOYD	CN CIUDAD HABANA
1988 ENE	25	FRENTE FRIO MODERADO	CN CIUDAD HABANA
1988 ENE	31	ANTICICLON	BARACOA
1988 ABR	12	BAJA EXTRATROPICAL	CN CIUDAD HABANA
1991 FEB	15	FRENTE FRIO 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	ANTICICLON	1993 BARACOA
1994 MAR	3	BAJA EXTRATROPICAL	CN CIUDAD HABANA
1994 OCT	17-18	GRADIENTE FUERTE	BARACOA
1994 NOV	14	HURACAN GORDON	CN HABANA-VARADERO
1994 DIC	18	BAJA EXTRATROPICAL	BARACOA
1994 DIC	23	BAJA EXTRATROPICAL	CN CIUDAD HABANA
1996 FEB	7	GRADIENTE FUERTE	BARACOA
1996 AGO	30	HURACAN EDOUARD	CN HOLGUIN-GUANTANAMO
1996 NOV	17	GRADIENTE FUERTE	BARACOA
1997 ABR	3	GRADIENTE FUERTE	CN HOLGUIN-GUANTANAMO

Donde :

CN- Costa Norte

CS- Costa Sur

Muestra Dependiente

Se consideraron 27 eventos constituidos por 142 casos entre los que aparecen en la cronología de inundaciones costeras en Cuba (Tabla 1.2.3) desde 1975. Se incluyen los casos de los días mencionados, y de dos días antes y dos días después, o sea para la baja del 23-12-94 se incluyen casos de los días 21, 22, 23, 24 y 25. Por ejemplo, para el evento del 22 y 23 de Noviembre de 1984 se incluyen los casos de los días 20, 21, 22, 23, 24 y 25. No se incluye una muestra independiente debido a la pequeña cantidad de eventos.

1.2.5 Métodos estadísticos

Los métodos estadísticos son un instrumento muy valioso para obtener resultados de gran utilidad práctica para su empleo en la solución de disímiles tareas vinculadas al pronóstico del tiempo.

Los métodos estadísticos tienen la ventaja de que resultan muy sencillos de aplicar y sus resultados se obtienen con gran rapidez y no requieren equipamiento complejo. Además el empleo de los métodos estadísticos obvia la necesidad de conocer detalladamente una serie de parámetros y peculiaridades físicas cuyo conocimiento y determinación resultan imprescindibles en los métodos de carácter dinámico. En particular, aquellas características geográficamente fijas como son, por ejemplo, la topografía y la batimetría o la influencia de algún efecto desconocido el método estadístico las asume de forma implícita a través del valor del predictando, si éste puede ser correctamente determinado mientras que en otros métodos se requiere conocer el valor de estos parámetros o realizar una parametrización compleja que no siempre ofrece buenos resultados. La limitación esencial de los métodos estadísticos radica en la dificultad de completar una muestra dependiente de alta calidad y con el tamaño adecuado. Este factor es especialmente importante en casos como el de las inundaciones costeras que no son fenómenos de alta frecuencia de ocurrencia. Por ese motivo fue necesario, como señalamos con anterioridad, estratificar la muestra agrupándola en un número menor que el de las situaciones sinópticas típicas que condicionan su surgimiento y no fue posible además hallar ecuaciones para varias de las situaciones sinópticas típicas, en particular las relativas a las inundaciones costeras del litoral sur de Cuba.

Se desarrolló un algoritmo a través de un conjunto de programas especialmente diseñados para crear un sistema sinóptico-estadístico para pronosticar la ocurrencia de inundaciones costeras en Cuba, su duración y la intensidad de las mismas. Se ejecutaron programas para validar el fichero maestro de datos iniciales. Entonces se ejecutó un programa que generó un fichero con los 208 predictandos y predictores a partir del fichero validado de los 174 datos iniciales. Se ejecutaron programas que generaron los ficheros de predictandos y predictores para cada estrato. A partir de este momento se siguió un proceso idéntico para cada uno de los estratos de forma separada para cada uno de ellos, calculándose la informatividad individual de los predictores y posteriormente se realizó una primera selección de predictores altamente informativos.

Posteriormente se ejecutaron programas para calcular la correlación mutua entre los predictores y se eliminaron aquellos predictores que siendo dependientes de otros fueran menos informativos que aquellos. De esta forma se generaron ficheros con los predictores más informativos e independientes entre sí y se procedió a calcular la informatividad conjunta de todas las posibles combinaciones de estos predictores y aunque habían combinaciones con un número menor de predictores que poseían una alta informatividad, tomando en cuenta que el número de predictores

previamente seleccionado no era excesivo se decidió tomar la combinación más informativa que en todos los estratos resultó ser la que combinaba a todos los predictores seleccionados. Entonces se procedió a ejecutar el análisis discriminante, cuyo objetivo era establecer un método de pronóstico de la ocurrencia de inundaciones costeras en Cuba. Se pasó seguidamente a generar ficheros para realizar una regresión lineal para cada estrato que además de contener los predictores seleccionados en el método de análisis discriminante tuviera los valores de los predictandos. Con estos ficheros se procedió a realizar la regresión lineal total de los predictores, así como una regresión por tamizado de variables con predictores capaces de reducir la varianza inexplicada en al menos un 1 %. Finalmente, se ejecutaron programas para generar ficheros de predictandos y predictores de tipo empírico y de tipo sinóptico de forma separada, se obtuvieron ecuaciones de regresión lineal con predictores de tipo empírico y de tipo sinóptico separadamente:

$$YE = INT + \sum_{i=1}^n c_i \cdot E_i \quad (1.2.1)$$

$$YS = INT + \sum_{k=1}^m c_k \cdot S_k \quad (1.2.2)$$

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

Entonces se procedió a calcular una regresión a través de un polinomio de segundo grado del tipo:

$$YF = A + B.YE + C.YS + D.YE^2 + E.YS^2 + F.YE.YS \quad (1.2.3)$$

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 ecuaciones cuadráticas de este tipo se puede pronosticar la altura de las olas significativas para los diferentes plazos desde 6 hasta 48 horas. Estas ecuaciones se pueden emplear siempre que se dé alguna de las situaciones sinópticas resumidas en la Tabla 1.2.2 y no obligatoriamente en caso de que mediante el análisis discriminante se pronostique la ocurrencia de una inundación costera y de esta forma este método se puede emplear para 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 categoría y persistencia, así como ratificar o no el propio pronóstico de ocurrencia de una inundación costera ya que este método permite deducir si habrá o no una inundación costera en dependencia de que

la altura de la ola significativa sea superior a los 2,5 m de altura en tramos costeros de tipo a o de 0,5 m de altura para los tramos de costa del tipo b. Además este sistema de ecuaciones permite obtener un juicio acerca de la continuidad o no del evento durante las próximas 48 horas.

El algoritmo termina con el desarrollo de dos programas independientes para el Pronóstico de la Ocurrencia de Inundaciones Costeras (POIC) y para el Pronóstico de la Altura de la Ola Significativa (PAOS) que se pueden combinar en un Pronóstico de inundaciones costeras (PIC).

Estos programas operativos se ejecutan virtualmente de forma instantánea y son de forma interactiva por lo que no se requiere de instrucciones especiales para su empleo, especificando automáticamente según el estrato los datos iniciales que se requieren. Estos programas fueron validados mediante la introducción de valores iniciales correspondientes a casos de los tres estratos comprobándose que daban idéntico resultado que los programas *la muestra dependiente* de análisis discriminante y de regresión cuadrática respectivamente.

1.2.6 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 es 1, si no la hay es 0
- E7- Si hay convergencia de isobaras es 1, si no la hay es 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)

En las Tablas 1.2.4 - 1.2.9 aparecen las ecuaciones lineales del tipo 1.2.1 y 1.2.2 obtenidas, señalándose los predictores que intervienen de acuerdo a la notación introducida con anterioridad y los coeficientes de regresión respectivos para todos los estratos y plazos.

Tabla 1.2.4 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	0.66323	1.04505	1.23299
E8	0.09050	0.13330	0.08556	0.17285	0.15436	0.07173	-0.05189	-0.11919

Tabla 1.2.5 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 1.2.6 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 1.2.7 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 1.2.8 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
E5	-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 1.2.9 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 1.2.10 - 1.2.12 aparecen las ecuaciones de regresión según el polinomio cuadrático descrito por la ecuación 1.2.3 para todos los estratos y plazos.

Tabla 1.2.10 Ecuaciones de regresión cuadrática (Estrato 1)

Plazo	A	B	C	D	E	F
6	-5696620	1076662	.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	.0323277	.8318464	-2.089879
36	-6.268880	-4.837065	16.200640	.0270470	-8.815636	4.5715510
42	2.3042660	-2.070584	-1.0598310	.0450792	-2.702015	1.9533500
48	1.2330970	-1.174789	-.21570150	.2464771	-.2275033	.9599559

Tabla 1.2.11 Ecuaciones de regresión cuadrática (Estrato 2)

Plazo	A	B	C	D	E	F
6	-.1119723	.9643366	.0171859	-.0909021	.2537457	-.1214019
12	-.2591220	1.0109270	.2611887	.0705884	.2680947	-.3836356
18	-.9511439	1.5309930	.7715894	-.0266123	.2851805	-.6343642
24	1.2273980	-.4061266	-1.5190170	.0870892	.5227703	.6043952
30	1.7790750	-.9656457	-2.0186790	-.0949309	.4892205	1.4991490
26	-.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 1.2.12 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	-.6942346	.3835765	.5908412	-.4326085
42	-.7442951	.4933364	.8965704	.1741705	-.0434231	-.0613414
48	2.4876500	.0126031	-3.6298660	.4014490	1.4602500	-.1149074

1.2.7 Análisis de los resultados

Un análisis de los valores de algunos parámetros importantes a partir de la muestra dependiente demuestra que 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 m, mientras que cuando no ocurre inundación costera el valor medio es siempre menor de 1,5 m. 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 km mientras que en los casos en que no ocurre inundación costera este parámetro es menor de 450 km. 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, aunque el tamaño de la muestra en este estrato es menor. En este caso, parece que el valor del fetch no es determinante para la ocurrencia o no del fenómeno. Por último señalaremos que 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. Es significativo que el Estrato 2 que comprende solamente a un tipo de situación sinóptica favorable para la ocurrencia de inundaciones es el que presenta el mayor cumplimiento mientras que el estrato con el menor cumplimiento se corresponde con el que agrupa a un mayor número de tipos de situaciones sinópticas.

Al analizar el cumplimiento del pronóstico de la altura de la ola significativa por los métodos de regresión se comprueba que 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 predictandos 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 análisis de las Tablas 1.2.13 - 1.2.15 permite corroborar lo anteriormente afirmado así como comprobar que en este caso los mejores resultados se obtienen para el Estrato 3.

También se aprecia que los errores van creciendo gradualmente hasta el plazo de 24 horas pero después los errores reflejan oscilaciones de forma que se mantienen acotados. El mayor error standard es de 1,508 m para el plazo de 48 horas en el Estrato 2. Sin embargo, al analizar el comportamiento de los errores absolutos medios que es un indicador de mayor importancia en el uso práctico de las ecuaciones se observa, como se refleja en la Tabla 1.2.16, que el mayor error ocurre en el Estrato 1 para el plazo de 30 horas y que es solamente de 1,119 m. También en las Tablas 1.2.13 - 1.2.15 se nota un comportamiento similar entre el método de regresión lineal por tamizado de variables cuando se toma como criterio de corte el no introducir predictores que no sean capaces de reducir la varianza inexplicada en al menos un 1 % y el método de regresión lineal de todos los predictores seleccionados. Asimismo se aprecia que inclusive estos métodos superan los resultados que se obtienen con las ecuaciones de regresión lineales para predictores

empíricos y de campo de forma separada pero no son capaces de brindar una respuesta de la misma calidad que la que se obtiene mediante el uso de un polinomio de segundo grado, cuyo ajuste es superior para todos los estratos y plazos.

Tabla 1.2.13 Error Standard de los diferentes métodos según los plazos. Estrato 1 (m)

Método	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 1.2.14 Error Standard de los diferentes métodos según los plazos .Estrato 2 (m)

Método	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 1.2.15 Error Standard de los diferentes métodos según los plazos .Estrato 3 (m)

Método	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

Tabla 1.2.16 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	0.307	0.350	0.757	0.642	0.594	0.455	0.528

Es interesante notar el porcentaje de casos que se ubica por debajo y por encima de diferentes cotas de error ya que los errores medios y standard reflejan en su valor la contribución de algunos casos con errores mucho mayores que los que usualmente ocurren.

número de casos menos 2. En la Tabla 1.2.20 aparecen los valores críticos del coeficiente de correlación simple para diferentes niveles de significación y el número de grados de libertad de los tres estratos considerados. En la Tabla 1.2.21 aparecen los coeficientes de correlación múltiples de las ecuaciones obtenidas para los diferentes estratos y plazos.

Comparando los valores contenidos en las Tablas 1.2.20 y 1.2.21 de acuerdo al criterio antes expuesto resultan significativas al nivel del 5 % todas las ecuaciones lineales para el Estrato 1, excepto las ecuaciones con predictores sinópticos para los plazos de 30, 36 y 42 horas. Todas las ecuaciones de regresión lineales para el Estrato 2 resultan significativas al nivel del 2 %. Para el Estrato 3 resultan significativas al nivel del 5 % todas las ecuaciones lineales excepto las ecuaciones con predictores sinópticos para los plazos de 18, 24, 36 y 48 horas. Pero, en definitiva, los valores calculados por estas ecuaciones lineales entran en calidad de predictores de las ecuaciones de regresión cuadráticas que son las ecuaciones finales en que se basan los pronósticos y todas las ecuaciones cuadráticas resultan significativas al nivel del 1 % para todos los estratos y plazos. Debido a que el nivel de confianza de las ecuaciones cuadráticas supera el 99 % es altamente probable que las ecuaciones obtenidas se comporten adecuadamente en la práctica bajo condiciones operativas de trabajo, es decir que los errores que se produzcan estén acotados al recorrido de valores de los errores obtenidos en la muestra dependiente.

Tabla 1.2.20 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

Tabla 1.2.21 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	0.32823
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

1.2.8 Conclusiones

Como resultado del trabajo desarrollado se logró profundizar en el estado de conocimiento sobre las inundaciones costeras en Cuba y las particularidades de su pronóstico. Resultó fundamental el establecimiento de una tipificación sinóptico-climatológica de las condiciones potenciales para la ocurrencia de una inundación costera en Cuba. Se estableció un criterio para calificar las inundaciones costeras según su intensidad con el fin de introducirlo en la terminología del pronóstico del tiempo en dependencia de las características físico-geográficas y batimétricas de los tramos de las costas de Cuba. Esto ya de por sí amplía la posibilidad de realizar un pronóstico sinóptico efectivo. Se realizó un algoritmo detallado para pronosticar mediante técnicas estadísticas la ocurrencia de inundaciones costeras en Cuba, su duración e intensidad sobre la

base de una encuesta realizada a un grupo de especialistas y la cronología de eventos. Se crearon dos nuevos métodos de pronóstico de las inundaciones costeras en Cuba. El método de pronóstico por regresión se puede emplear además para la confección del pronóstico del estado del mar en las costas de Cuba aún en caso de que no haya inundaciones costeras siempre que se dé alguna de las situaciones sinópticas típicas previstas en los estratos considerados.

La calidad de los resultados de las ecuaciones estadísticas obtenidas sobrepasan las expectativas iniciales por el alto porcentaje de cumplimiento, el valor de los errores medios y la alta significación de las ecuaciones finales. Sería recomendable en el futuro completar la cronología de inundaciones costeras en Cuba, sobre todo en lo que respecta a la costa sur para posibilitar el completamiento de un sistema estadístico integral de este tipo de eventos.

Los resultados de esta investigación dotan al Servicio Meteorológico de Cuba con nuevas técnicas para pronosticar las inundaciones costeras y de esta forma contribuir a prevenir mediante medidas de mitigación las pérdidas materiales y humanas en las zonas costeras de Cuba.

1.3 Aplicación de un modelo espectral para el cálculo de los campos de olas en mar profundo

1.3.1 Introducción

Históricamente ha sido necesario contar con análisis objetivos de los campos de olas en diferentes áreas oceánicas, con el fin de tener la más cercana representación del estado de la superficie del mar, lo cual serviría a los propósitos del pronóstico marino para la navegación de travesía, pesquerías en alta mar y para la vigilancia y prevención de desastres en las costas por fuertes oleajes.

En las condiciones actuales del Servicio de Meteorología Marina de Cuba, el análisis manual de los campos de oleaje oceánico tiene una apreciable carga de subjetividad debido a la escasez de datos de estaciones móviles y automáticas (boyas ancladas o a la deriva) en su área de interés, que abarca el Golfo de México, el Mar Caribe y el Océano Atlántico Norte. Los criterios objetivos empleados en el análisis manual se han obtenido de la aplicación de métodos paramétricos, los cuales resuelven fórmulas semiempíricas que simulan la generación de olas total y no totalmente desarrolladas, no teniendo en cuenta los procesos de disipación por ruptura de crestas o *whitecapping*, interacciones no lineales entre olas y cambios en la dirección del viento.

Por su parte, los modelos espectrales se basan en la solución de la ecuación de transferencia de la energía de la ola y pueden simular mucho mejor los procesos de propagación del mar de viento y el mar de leva, su disipación y las interacciones no lineales. Varios autores como Resio (1981), Perrie (1987), Khandekar y Lalbeharry (1989) y Khandekar (1990) se han dedicado a este tema, con resultados importantes.

La aplicación de un modelo espectral de olas oceánicas por el Servicio de Meteorología Marina, para el desarrollo de las técnicas de predicción de las inundaciones costeras, constituye la primera experiencia de trabajo con un método avanzado de cálculo de los campos de olas oceánicas.

El conocimiento de los campos de olas en mar profundo es imprescindible para estimar la posibilidad de ocurrencia de una inundación costera, lo que está en dependencia de la altura de la ola máxima en el área generadora, su dirección de propagación y si el oleaje es por viento o por mar de leva.

1.3.2 Características del modelo espectral utilizado

El procedimiento empleado para la determinación de los campos de olas se denomina WHIP (Wave Hindcasting Information Procedure) y utiliza el modelo de olas oceánicas confeccionado por D. T. Resio (1981). Mediante este procedimiento se realiza el *hindcasting* o *retroanálisis* para caracterizar los sistemas meteorológicos ocurridos que han generado oleaje; en él se introducen como datos iniciales los campos de presión y vientos de las cartas sinópticas, posteriormente utiliza un intervalo de tiempo que permite calentar el modelo, generar y propagar las olas hacia los sitios de interés.

La versión original de este procedimiento para ordenador CRAY, cuenta con ocho programas de cálculo más dos programas de edición opcionales, conformados en lenguaje *Fortran* v. Cada programa consiste en un archivo fuente que contiene las declaraciones de variables y algoritmos de cálculo, el archivo de corrida que se encarga de procesar, contar, cargar y controlar las declaraciones, además de ejecutar el programa, guardar los archivos diario, de salida y un archivo diario que contiene el registro real de ejecución del proceso, el cual debe ser revisado luego de cada corrida para asegurarse de su éxito. Los archivos de salida de cada programa constituyen los datos de entrada del próximo y tres de ellos reciben más de un archivo como entrada.

La versión que se adaptó para PC requirió incluir los argumentos de lectura y escritura de ficheros dentro de los programas fuentes, para más tarde compilarlos en *Fortran Power Station* con el objetivo de obtener los programas ejecutables.

Los programas ejecutables que forman parte del procedimiento de retroanálisis son los siguientes:

EDMAPC.EXE: Busca errores en el campo de presiones digitizado, el cual se ha denominado EDMAP.DAT, y eliminarlos. Los datos iniciales de presión se toman de una rejilla geográfica preestablecida de $10^{\circ} \times 10^{\circ}$.

PMAP2C.EXE: Interpola el campo de presiones revisado por EDMAPC.EXE sobre una rejilla geográfica fina de $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$. La salida de este programa es un archivo P.DAT.

XWNDC.EXE: Estima las velocidades y direcciones del viento a 19,5 m por encima del nivel del mar, empleando las informaciones sobre presiones y gradientes horizontales y verticales de temperatura en la capa fronteriza planetaria. XWND.EXE recibe como entrada el archivo P.DAT y genera un archivo W.DAT, que contiene velocidades y direcciones del viento para cada punto de la rejilla fina en cada fecha y hora de la serie.

EDBBC.EXE: Busca errores en el archivo BBFILE.DAT, que contiene los datos del análisis cinemático, mediante el cual se estima el patrón del flujo de vientos superficiales a partir del análisis de las observaciones disponibles, la localización e interacción de los ciclones y anticiclones, la orientación y gradientes de las isobaras que enlazan tales sistemas. El objetivo principal de este análisis es ajustar el conjunto de observaciones de una carta meteorológica particular a un patrón de flujo preconcebido.

BWNDC.EXE: Combina los vientos obtenidos mediante el programa XWNDC.EXE con los estimados a partir del análisis cinemático. El algoritmo de mezcla incluido en este programa da factores de escala de 0,8 para las velocidades del viento del análisis cinemático y de 0,2 para las velocidades del viento generadas por XWNDC.EXE. Al final se crea un archivo X.DAT, que es el campo final de vientos.

GRIDC.EXE: Crea una rejilla ortogonal esférica (ROE) sobre la que se interpola los campos de vientos contenidos en X.DAT. Este tipo de rejilla consiste en un sistema de coordenadas donde los paralelos son trayectorias de círculo máximo con dirección aproximada este - oeste y los meridianos son las ortogonales con dirección aproximada norte - sur. La salida de este programa es un archivo GD.DAT que contiene la latitud y longitud de cada punto de la ROE.